

TARTU ÜLIKOOL

Loodus- ja täppisteaduste valdkond

Keemia instituut

Sander Hermet

**HEITVEE FILTRATSIOONITEHNOLOOGIA  
REOVEEPUHASTI FOSFORIÄRASTUSEKS**

Bakalaurusetöö (12 EAP)

Juhendajad: PhD Taavo Tenno

MSc Markus Raudkivi

Tartu 2018

# Sisukord

Sissejuhatus .....	3
1. Kirjanduse ülevaade .....	4
1.1 Fosforühendid reoainetena .....	4
1.2 Fosforiärastus reoveepuhastites .....	4
1.3 Reoainete lubatud piirmäärad heitvees .....	5
1.4 Heitvee järelfiltratsioon .....	6
1.4.1 Võrk-kangasfiltrid .....	6
1.4.2 Narmasfiltrid .....	8
1.4.3 Membraanfiltratsioon .....	10
2 Eksperimentaalne osa .....	12
2.1 Katseplaan .....	12
2.2 Proovivõtukord ja meetodikad .....	12
2.3 Reoveepuhastid .....	13
2.4 Tulemused ja analüüs .....	14
2.4.1 Hõljuvaine (HA) .....	14
2.4.2 Fosfor .....	16
2.4.3 Keemiline hapnikutarve (KHT) .....	18
2.4.4 Lämmastik .....	19
2.4.5 Reoveepuhasti 2 aktiivmuda väljakanne .....	21
2.5 Järeldused .....	24
Kokkuvõte .....	26
Kasutatud kirjandus .....	27
Lisa 1. ....	30
Lisa 2. ....	31
Lisa 3. ....	32
Summary .....	33
Tänuavaldused .....	35
Infoleht .....	36
Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks .....	38

# Sissejuhatus

Reoveepuhastite eesmärk on puhastada olme- ja tööstuslikku reovett. Puhastamise käigus eemaldatakse reoveest üleliigne orgaaniline süsinik ning lämmastik- ja fosforühendid. Need ained on ka looduslikus vees esindatud ja tegemist on oluliste toitainetega vee-elustikule, kuid kõrgemate kontsentratsioonide korral võivad nad looduskeskkonda negatiivselt mõjutada, tuues kaasa näiteks vetikate massilise paljunemise ehk eutrofikatsiooni. Puhastatud vesi ehk heitvesi väljutatakse jõgedesse, järvedesse, merre või pinnasesse.

Fosfor esineb reovees peamiselt orgaanilise ja anorgaanilise fosforina, mis eemaldatakse reoveepuhasti tööprotsessis bioloogilise või keemilise ärastuse käigus. Kuigi nende kahe tehnoloogia rakendamine on olnud ajalooliselt piisav, on seoses ühiskonna teadlikkuse tõusu ja rangemate piirnormidega tekkinud vajadus veelgi väljavoolu üldfosfori sisaldust vähendada.

Läänemere merekeskkonna kaitse konventsioon (HELCOM) on kõikidele Läänemerega piirnevatele riikidele andnud välja soovitused, mille eesmärk on vähendada reoveepuhastitest looduskeskkonda jõudvate reoainete kontsentratsioone. Eesti Vabariigi Valitsus on olnud viimaste aastakümnete jooksul väga eesrindlik nende soovituste elluviimisel ja muutnud määrusega kehtestatud reoainete piirnorme aina rangemaks. Kõige rohkem mõjutavad need piirmäärad just suurema reostuskoormusega reoveepuhasteid [1].

Tähelepanu on suunatud hõljuvainele, sest see sisaldab olulisel määral fosforit ja väljavoolu fosfori madalate piirmäärade (0,5 - 2 mg/l) saavutamiseks on vaja ka hõljuvaine heitveest eemaldada. Eesmärk on saavutada parem heitvee kvaliteet ja vähendada saastetasusid. Iga tonni üldfosfori eest, mis juhitakse veekogusse või pinnasesse tuleb tasuda saastetasuna 12 014€[2].

Kui reovee töötlemisel eemaldatakse hõljuvaine peamiselt setitamise teel, siis lisaabinõuna on kasutusele võetud järelfiltratsioon. Eestis on reoveepuhastites enim kasutust leidnud kangasfiltrid: võrk-kangas- ja narmasfiltrid. Filtrite eesmärk on reoveepuhasti heitveest filtreerida välja enamik järelejäänud hõljuvainest, eesmärgiga viia fosfori kontsentratsioon väljavoolus võimalikult madalaks. Lisaks aitab järelfiltratsioon reoveepuhastil toime tulla ootamatult kõrgete reoainete kontsentratsioonidega.

Käesoleva töö eesmärk on anda ülevaade järelfiltratsiooni tehnoloogiast, võrrelda järelfiltrite fosforiärastuse efektiivsust kolme Eestis kasutusel oleva reoveepuhasti järelfiltri näitel ning anda hinnang, milline tehnoloogia on fosforiärastuseks kõige parem. Lisaeesmärk on kinnitada, et hõljuvaine sisalduse vähendamisega heitvees saab alandada ka üldfosfori kontsentratsiooni.

# 1. Kirjanduse ülevaade

## 1.1 Fosforühendid reoainetena

Fosfori näol on tegemist olulise toitainega ning selle kõrgem kontsentratsioon looduskeskkonnas võib esile kutsuda kiire veetaimestiku ja vetikate kasvu. See toob omakorda kaasa vees lahustunud hapniku kontsentratsiooni vähenemise ning veekvaliteedi üldise languse [3]. Seetõttu klassifitseeritakse fosfor reoveekäitluses olulise tähtsusega reoaineks.

Olmereovees sisalduvad fosforiühendid on sinna sattunud peamiselt inimtegevuse tagajärjel, sealjuures kõige suurem fosfori osakaal tuleneb pesuainetest ja väljaheidetest. Keskmiselt jõuab olmereovette ühe inimese kohta umbes 2 g fosforit päevas. Olmereovee keskmine fosforisisaldus kõigub olulisel määral erinevates tingimustes, kuid jääb tavaliselt vahemikku 4-22 mg/l [4].

Tööstusliku reovee puhul on suurimateks reostajateks põllumajanduses kasutatavad fosforväetised ning erinevad keemia- ja mäendusettevõtted, mille tegevuse tagajärjel fosforiühendid reovette või halvemal juhul isegi otse looduskeskkonda satuvad. Tööstuslikus reovees võib fosforisisaldus olla oluliselt suurem kui olmereovees [5].

Reovees esinevad fosforiühendid orgaanilisel ja anorgaanilisel kujul. Orgaanilised fosforiühendid esinevad suhkrutes, fosfolipiidides ja nukleiinhapetes. Anorgaaniline fosfor esineb vees lahustunud orto- või polüfosfaatide kujul. Kõik reovees sisalduvad fosforiühendid moodustavad kokku üldfosfori ( $P_{\text{üld}}$ ) [6].

## 1.2 Fosforiärastus reoveepuhastites

Reoveepuhastites on kasutusel mitmeid erinevaid tehnoloogiaid fosforiärastuseks. Olenevalt reovee hulgast, koostisest ja päritolust tuleb iga reoveepuhasti jaoks kasutusele võtta just sellele olukorrale sobiv tehnoloogia või tehnoloogiad.

Kõige laiemalt kasutusel olev tehnoloogia on bioloogiline fosforiärastus. Tegemist on protsessiga, mille käigus tarbivad bakterid reoveest süsinikku, lämmastiku ja fosforit ning seda suhtes 100:5:1. Tõhustatud versioon bioloogilisest fosforiärastusest, kus vaheldatakse bakterite keskkonda aeroobsest anaeroobseks, suudab seda teha suhtes 100:5:3. Üheks probleemiks selle suhte puhul on suur orgaanilise süsiniku ärastus, mille tõttu võib bioloogilises puhastuses jääda

süsinikust puudu ja vees olev fosfor jääb bakterite poolt tarbimata. [9]. Vajadusel on võimalik lisada reovette lisasüsinikku (enamasti metanoolina), et muuta reovees toitainete suhe sobivaks.

Fosfori keemiline sadestamine seisneb fosfori koaguleerimises keemiliste ühendite toimetel. Tavaliselt on koagulandina kasutusel kaltsiumhüdraadid või raua- ja alumiiniumsoolad. Vees lahustunud fosfor seob end koagulandiga ning moodustub raskesti lahustuv ühend, mis põhja settib ning hiljem süsteemist eemaldatakse [10].

Kui bioloogilise fosforiärastuse ja keemilise sadestamise teel ei suudeta piisavas koguses fosforit reoveest eemaldada, siis on võimalik kasutusele võtta järelfiltratsioon. Järelfiltratsiooni kasutatakse ka olukorras, kus reoveepuhastis ei suudeta piisavalt hästi aktiivmuda või koaguleeritud osakesi setitada ning heitveega kantakse neid liiga suures koguses välja. Selline olukord võib tekkida ka kõrgemate reoveepuhasti sissevoolude korral (suured vihmajärged, lumesulamisvesi).

### 1.3 Reoainete lubatud piirmäärad heitvees

Heitvee reostusnäitajate piirväärtused ja puhastusastmed on välja toodud Eesti Vabariigi Valitsuse poolt välja antud määruses „Reovee puhastamise ning heit- ja sademevee suublasde juhtimise kohta esitatavad nõuded, heit- ja sademevee reostusnäitajate piirmäärad ning nende nõuete täitmise kontrollimise meetmed”. Reostuskoormused on jaotatud viite erinevasse astmesse, kus kõigile on kohaldatud konkreetsed reostusnäitajate piirmäärad bioloogilisele ja keemilisele hapnikutarbele, üldfosforile, üldlämmastikule ning hõljuvainele [Tabel 1.].

**Tabel 1 - Heitvee reostusnäitajate piirväärtused [1]**

Reostusnäitaja	Reoveekogumisala reostuskoormus				
	Alla 300 ie	300–1999 ie	2000–9999 ie	10 000–99 999 ie	100 000 ja enam ie
	Piirväärtus (mg/l)	Piirväärtus (mg/l)	Piirväärtus (mg/l)	Piirväärtus (mg/l)	Piirväärtus (mg/l)
BHT <sub>7</sub>	40	25	15	15	15
KHT	150	125	125	125	125
Püld	Ei kohaldata	2	1	0,5	0,5
Nüld	Ei kohaldata	60	45	15	10
Hõljuvaine	35	35	25	15	15

Üldfosfor peab jääma heitvees alla 2, 1 või 0,5 mg/l, vastavalt reoveekogumisala reostuskoormusele. See on suhteliselt madal kontsentratsioon ja suuremates reoveepuhastites suudetakse erinevate fosforiärastuse tehnoloogiatega see ka saavutada. 300 – 100 000 ja enam inimekvivalendise reostuskoormusega reoveepuhastite reostusnäitajate piirmäärad vastavad Läänemere merekeskkonna kaitse konventsioon 15.11.2007.a välja antud soovitustele 28E/5, mille eesmärk on vähendada Läänemerega piirnevate riikide looduslikesse veekogudesse juhitava heitvee reoainete koguseid [1, 7].

Läänemere merekeskkonna kaitse konventsioon on 15.11.2007.a. välja antud ka soovitus 28E/6, mille kohaselt on soovituslik piirata kuni 300 inimekvivalendise reostuskoormusega puhastite üldfosfori piirmäära reoveepuhasti väljavoolus 5 mg/l peale. Seni pole alla 300 inimekvivalendise reostuskoormusega puhastite väljavoolule Eesti Vabariigi seadusandluses üldfosfori piirmäära ega puhastusastet kohaldatud [1, 8].

## **1.4 Heitvee järelfiltratsioon**

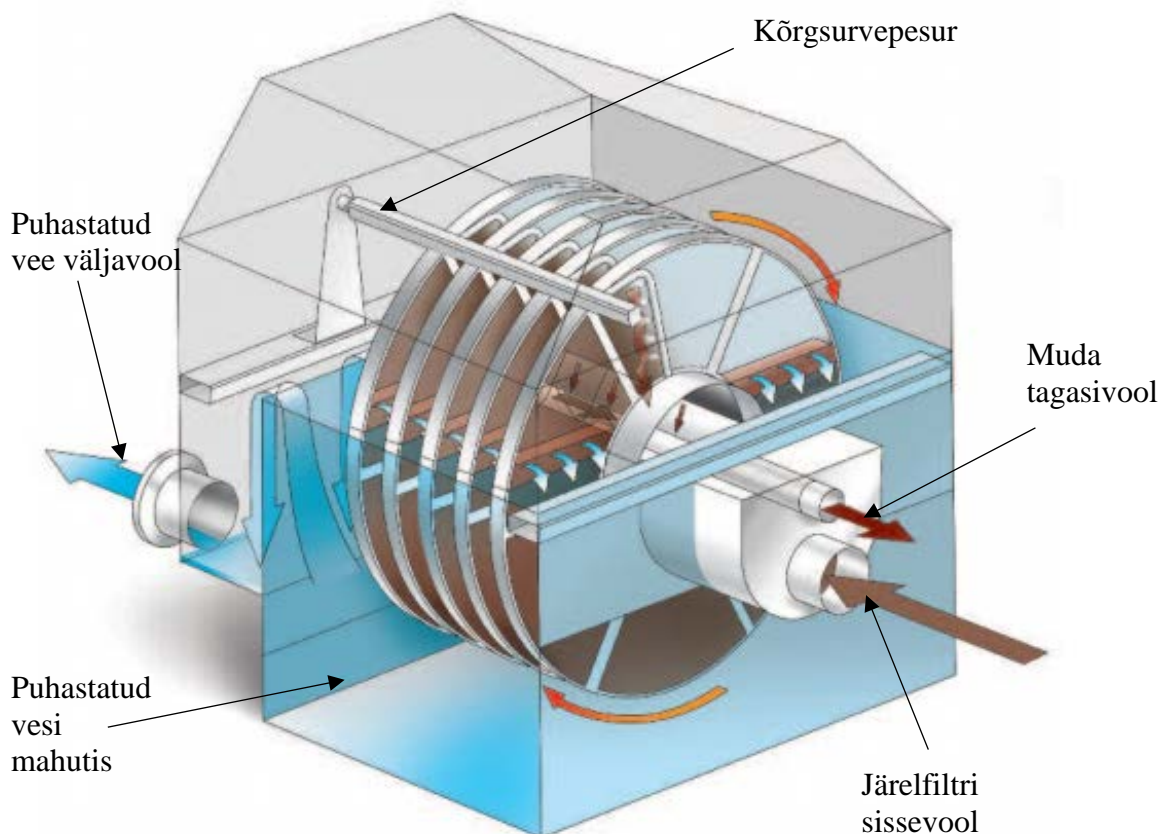
Olmereovesi sisaldab keskmiselt 4-22 mg/l fosforit [4]. Bioloogilise fosforiärastuse ja keemilise sadestamise teel on võimalik reoveest eemaldada peamiselt anorgaanilised fosforiühendid. Selleks, et kätte saada ka orgaanilised fosforiühendid, mida leidub kõige rohkem hõljuvaine seondunult, tuleb reoveepuhastites kasutusele võtta järelfilter [6, 11].

Võrk-kangas-, narmas- ja membraanfiltratsioon on ühed enim kasutatavatest järelfiltratsiooni tehnoloogiatega. Eestis on kõik kolm tehnoloogiat esindatud erinevate reostuskoormustega puhastites. Antud töös antakse täpsem ülevaade praktilises osas uuritavate filtratsioonitehnoloogiate kohta (võrk-kangas- ja narmasfiltrid).

### **1.4.1 Võrk-kangasfiltrid**

Võrk-kangasfiltrid tööpõhimõtte seisneb vee pumpamises filtri keskmises asuvasse trummlisse, kust see gravitatsiooni toimel voolab läbi filtri ketastel paikneva filtermaterjali ümbritsevasse mahutisse ja sealt väljavoolu. Filtermaterjali siseküljele kogunev hõljuvaine hakkab vee läbivoolu takistama, mille tõttu toimub filterketaste tagasipesu. Tagasipesu toimub kas samaaegselt filtratsiooniga või on manuaalselt käivitatav. Selle käigus pestakse kõrgsurvepesuriga juba eelnevalt puhastatud veega filtrid läbi, sealjuures on pesur paigal ja filtri kettad keerlevad ümber keskse trummlile. Filtermaterjalile kogunenud hõljuvaine liigub filtri sees

muda tagasivoolu, mis omakorda pumbatakse edasi mudakogumismahutisse. Tagasipesu tsükli käigus kasutatakse umbes 0,1 - 3% filtri läbivoolust ehk puhastatud vee kulu on suhteliselt minimaalne [12].



**Joonis 1 - Võrk-kangasfiltri läbilõige ja tööpõhimõte, joonis täiendatud [13]**

Filtermaterjalina on kasutusel 10-100  $\mu\text{m}$  läbimõõduga avadega kangas või plastik. Üks ketas dimensioneeritakse keskmiselt 60  $\text{m}^3/\text{h}$  läbivoolu kohta, mis tähendab, et suur filter, mis koosneb kuni 24 kettast suudab läbi filtreerida kuni 1440  $\text{m}^3/\text{h}$ . Võrk-kangasfiltri suurimaks eeliseks on kompaktsus, lihtne dimensioneerimine ja hooldamine. Iga filter dimensioneeritakse vastavalt reoveepuhasti vajadusele ja reovee olemusele. Olulisteks aspektideks on ketaste arv, nende läbimõõt ning filtermaterjali poorsus ja materjal. Dimensioneerimisel arvestatakse eeldatavat läbivoolu ning hõljuvaine kontsentratsiooni ja osakeste suurusjaotust [13, 14].

Võrk-kangasfiltrite kasutusalaudeks võivad olla: reoveepuhasti väljavoolu järelfiltratsioon, joogivee eelfiltreerimine ja tööstusliku reovee eelfiltreerimine enne üldkanalisatsiooni laskmist [15].

Kruger Hydrotech'i võrk-kangasfiltrit on testitud ka eksteemolukordades, kus vee läbivool ja hõljuvaine kontsentratsioon on keskmisest oluliselt kõrgem. Katse käigus võrreldi võrk-kangasfiltrit suutlikkust toime tulla kõrgete hõljuvaine kontsentratsioonidega erinevate vooluhulkade korral. Madalamatel vooluhulkadel suutis võrk-kangasfilter filtreerida hõljuvainet stabiilselt soovitud kontsentratsioonini. Kõrgemate vooluhulkade korral ei suutnud filter anda soovitud tulemusi ka koagulatsiooni esile kutsuvate kemikaalide lisamisel [16].

Eestis on suuremates reoveepuhastites teadaolevalt kasutusel Saksamaal ja Rootsis toodetud Huber'i ja Kruger Hydrotech'i võrk-kangasfiltrid.

#### **1.4.2 Narmasfiltrid**

Suurim erinevus võrk-kangasfiltrist on filtermaterjal ja vee liikumise suund. Antud filtreid nimetatakse narmasfiltriteks, sest nende ketastel paiknev filtermaterjal koosneb narmasvaibale sarnanevast kangast [17].

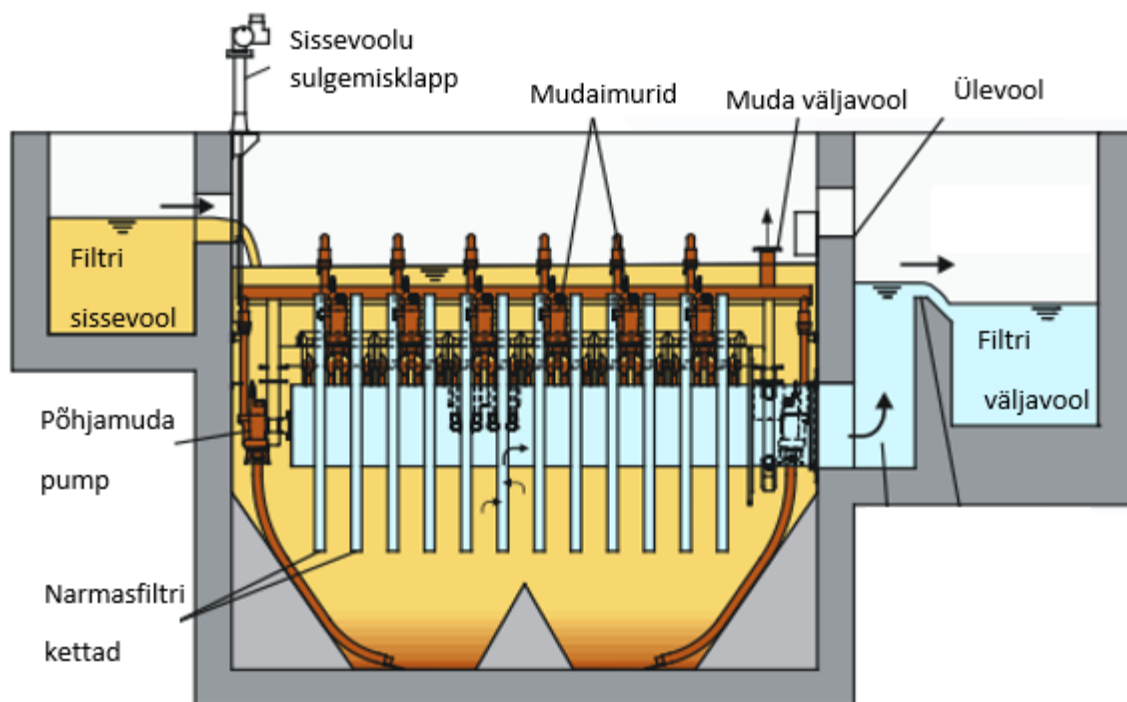
Narmasfilter asetseb tavaliselt betoonist mahuti põhjas. Mahutisse suunatakse filtri pealevool ja filter asetseb suuremas osas vee all. Gravitatsiooni toimel liigub vesi ümbritsevast mahutist läbi filtermaterjali keskmisesse trummelisse ning sealt edasi väljavoolu. Kui väljavoolu ja sissevoolu veetasemete vahe jõuab üle 20 - 30 cm (vastavalt filtri dimensioneerimisele), siis käivitub puhastussükkel. Filter hakkab mahutis ringlema ja käivitatakse mudaimur, mis filtermaterjalilt hakkab imema sinna jäänud muda. Seejärel muda pumbatakse edasi mudakogumismahutisse. Sinna pumbatakse ka filtri mahuti põhja sadenenud hõljuvaine, mis filtermaterjali narmaste küljes on akumulunud ja hiljem põhja settinud. Puhastussükkel ei häiri filtri tegevust ja toimub samaaegselt hõljuvaine filtreerimisega [17, 18].

Narmasfiltrit üsna tihti koosneb 6-8 segmendist, mida on võimalik ükshaaval eemaldada ja hooldada. Üks filter võib mahutada 18-24 ketast, mis suudab kokku filtreerida kuni 2400 m<sup>3</sup>/h. Narmasfilter on kompaktne – 1 m<sup>2</sup> kasutatava horisontaalpinna kohta on võimalik dimensioneerida kuni 6 m<sup>2</sup> filtripinda [17].

Suurim erinevus võrk-kangas- ja narmasfiltril on filtermaterjal ja selle ülesehitus. Kui võrk-kangasfiltril toimub hõljuvaine filtreerimine kahedimensiooniliselt ehk ühes tasapinnas, siis narmasfiltrit filtermaterjal koosneb väga paljudest peenikestest narmastest, mis märjaks saades vajuvad üksteise peale ja moodustavad tiheda takistuse. Esiteks võimaldab see veest kätte saada veelgi väiksema läbimõõduga hõljuvaine. Lisaks toimub filtratsioon kolmedimensiooniliselt, sest narmad suudavad vett filtreerida kõikidelt külgedelt. Suurenenud filtreerimispind tähendab,



et narmasfilter suudab paremini toime tulla ka kõrgemate hõljuvaine kontsentratsioonide ning suuremate filtrit läbivate vooluhulkadega [16].



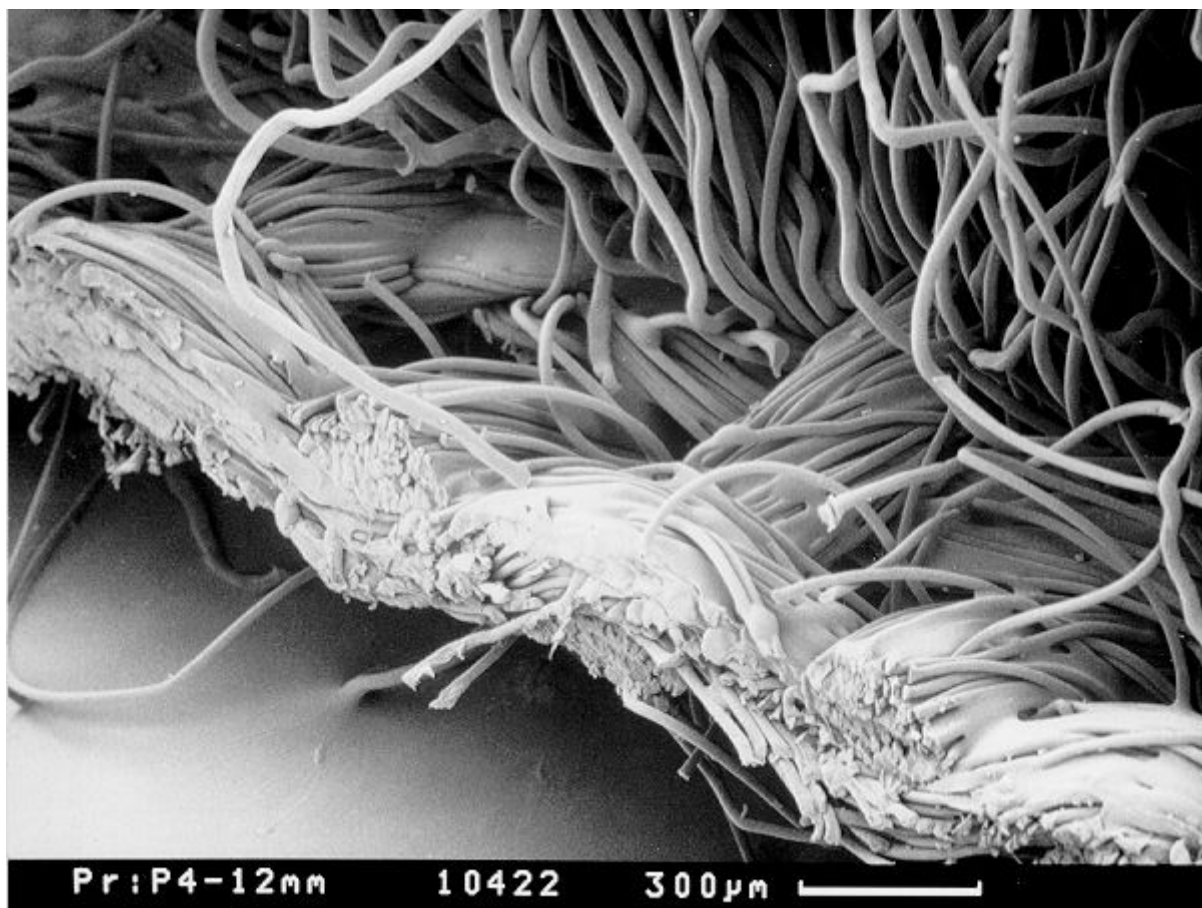
**Joonis 2 - Narmasfiltri läbilõige ja tööpõhimõte, joonis täiendatud [17]**

Narmasfiltrit on võimalik kasutada kõikides olukordades, kus on vaja vähendada hõljuvaine kontsentratsiooni. Sellest tulenevalt on narmasfiltrite üheks peamiseks kasutusala vee filtreerimine reoveepuhastite väljavoolus üldfosfori kontsentratsiooni vähendamiseks. Seda saab kasutada ka settimismahutite asemel hõljuvaine esmaseks filtreerimiseks. Lisaks on leidnud narmasfiltrid kasutust eelfiltratsioonis – enne reovee bioloogilist fosforiärastust, membraanpuhastust või UV-desinfitseerimist. Ühtlasi kasutatakse narmasfiltreid joogivee eelpuhastuses või isegi ehitusplatside ning tööstuste reovee väljavoolu eelfiltreerimiseks. 2014.a. seisuga on kasutusel üle 2000 Mecana narmasfiltri, millel on kokku üle 90 000 m<sup>2</sup> filtripinda [19, 20].

Narmasfiltriga on teostatud pilootkatseid, mille raames tõsteti sissevoolus hõljuvaine kontsentratsioone keskmiselt 7,5 mg/l peale ning üldfosforit 0,3 mg/l peale. Keskmise filtri väljavool sisaldas 1,2 mg/l hõljuvainet ja üldfosforit 0,11 mg/l. Ekstreemtingimustes, kus hõljuvaine sissevool filtrisse oli üle 300 mg/l suutis narmasfilter ikka anda väljavoolus hõljuvaine kontsentratsiooniks alla 5 mg/l. Lisaks on tehtud narmasfiltriga katseid, mille raames üritati tuua üldfosfori kontsentratsioon reoveepuhasti väljavoolus püsivalt alla 0,1 mg/l.

Selle jaoks lisati sissevoolu püsivalt koagulatsiooni esile kutsuvaid kemikaale, mille tõttu muutus hõljuvaine veelgi paremini kättesaadavaks filtermaterjali jaoks. Nende katsete tulemusena näidati, et narmasfiltriga on võimalik püsivalt hoida üldfosfori kontsentratsioonid väljavoolus alla 0,1 mg/l, juhul kui toimus püsiv kontroll koaguleerimisreagentide kontsentratsioonide ja koaguleerimisaja üle [21, 22].

Eestis on teadaolevalt kasutusel vähemalt üks Šveitsis toodetud Mecana narmasfilter.



**Joonis 3 - Elektronmikroskoobiga tehtud pilt narmasfiltri narmastest [17]**

#### **1.4.3 Membraanfiltratsioon**

Membraanfiltratsiooni tööpõhimõte seisneb vee mikro- või ultrafiltratsioonis. Mikrofiltratsiooni puhul on filtri avade läbimõõduks 0,1 – 10 μm ja ultrafiltratsiooni puhul on avad veelgi väiksemad, kuni 0,01 μm. Membraanfiltrite eesmärk reoveepuhastuses on sarnane kangasfiltritele – vähendada reoainete kontsentratsiooni puhasti väljavoolus. Kuna tegemist on keerulisema ja kallima tehnoloogiaga, siis seda kasutatakse rohkem olukordades, kus väljavoolu reoainetele on kehtestatud karmimad piirmäärad (joogivesi, ohtlike ainetega tegelevad tööstused, ravimitööstused).

Erinevalt kangasfiltritest on membraanfiltrite puhastamine tehnoloogiliselt keerukam. Enim levinud filtrite puhastustehnoloogiad on filtrite aeratsioon, keemiline tagasipesu, kõrgesurve veega tagasipesu või vahelduv difusioon, mille jooksul membraanfiltrile ladestunud hõljuvaine tagasi sissevoolu settib. Viimase variandi puhul on oluline ka samaaegne filtri aeratsioon [9, 23].

Membraanfiltrite suurimaks eeliseks on see, et neid saab rakendada hästi teiste tehnoloogiate siseselt, näiteks membraanbioreaktorites. Membraanbioreaktorite kasutuselevõtuga on võimalik reoveepuhasti oluliselt väiksemaks dimensioneerida, sest selle tehnoloogia kasutamisel ei vaja tavaliselt reoveepuhasti mahukaid järelseteid.

Suurimaks piiranguks on tehnoloogia kulukus ja potentsiaalsed ekstreemolukorrad, kus reoainete kontsentratsioonid on tavaolukorrast kõrgemad või on vooluhulgad suuremad. Viimasel juhul võib filtratsioonikiirus olulisel määral väheneda, mistõttu suur osa reoveest suunatakse otse ülevoolu või tagasi ühtlustusmahutitesse [23].

## **2 Eksperimentaalne osa**

### **2.1 Katseplaan**

Punktproovid on võetud kolmest Eesti reoveepuhastist. Kahes neist on järelfiltratsiooniks paigaldatud võrk-kangasfiltrid ja kolmandas narmasfilter, edaspidi viidatud kui „Reoveepuhasti 1“, „Reoveepuhasti 2“ ja „Reoveepuhasti 3“ või joonistel kui „RVP 1“, „RVP 2“ ja „RVP 3“. Reoveepuhastist 1 ja 2 on võetud proovid 2016.a. kevadel ja sügisel ning reoveepuhastist 3 2018.a. kevadel. Kõik proovid on võetud reoveepuhastites pärast järelsetiteid, enne järelfiltri sissevoolu ning pärast järelfiltri väljavoolu. Reoveepuhastis 2 on lisaproovid võetud aktiivmuda väljakande ajal, et anda hinnang filtri tööle ekstreemolukorras. Reoveepuhastis 3 on lisaks võetud proovid ühtlustusmahutis, eesmärgiga võrrelda hõljuvaine kontsentratsioonide erinevust järelfiltri sissevoolus ja ühtlustusmahutis.

Kõikidest proovidest on mõõdetud keemilise hapnikutarbe, hõljuvaine, fosfaatioonide, üldfosfori, üldlämmastiku, nitraat-, nitrit- ja ammooniumlämmastiku kontsentratsioonid. Filtri sisse- ja väljavoolu reoainete kontsentratsioonide võrdlemisel saame anda ülevaate järelfiltri efektiivsusest. Reoveepuhastis 2 aktiivmuda väljakande ajal võetud proovides on mõõdetud hõljuvaine, fosfaatioonid ja üldfosfor, sest antud töö puhul on nende reoainete muutus kõige olulisemaks võrdluselemendiks.

### **2.2 Proovivõtukord ja metoodikad**

Kõik proovid on võetud vastavalt ISO standardile EVS-ISO 5667-10 ja proovid olid säilitatud vastavalt ISO standardile EVS-EN ISO 5667-3:2012 [24, 25]. Eksperimentaalse osa jooksul tehtud katsed ja analüüsid toimusid Tartu Ülikooli Keskkonnaanalüüsi laboris. Tulemuste töötlemiseks kasutati programmi MS Excel.

Tabelis 2 välja toodud pH, üldfosfori, KHT, hõljuvaine, üldlämmastiku, nitrit- ja nitraatlämmastiku mõõtemääramatused on Nordtestiga arvutatud laiendmääramatused. Fosfaatioonide ja ammooniumi mõõtemääramatused on arvutatud võttes paralleeltulemustest standardhälve ning see korrutatud katteteguriga 2.

**Tabel 2 - Kasutatud analüüsimetoodikad, aparatuur ja arvutatud mõõtemääramatused**

Parameeter	Metoodika	Aparatuur	Mõõtemääramatus
<b>pH</b>	EVS-EN ISO 10523:2012	pH-meeter Jenway 3520	0,8%
<b>KHT<sub>Cr</sub></b> (dikormaatne KHT)	ISO 6060:1989(E)	Spektrofotomeeter Hach Lange DR 2800, Termostaat Hach Lange LT 200	12%
<b>Hõljuvaine (HA)</b>	EVS-EN 872:2005	Polüamiidmembraanfiltrid, Kuivatuskapp SNOL 67/350, Analüütiline kaal Scaltec Instruments SBC31	21%
<b>PO<sub>4</sub>-P</b>	EN ISO 6878:2004	Spektrofotomeeter Hach Lange DR 2800	3%
<b>P<sub>üld</sub></b>	EN ISO 6878:2004	Spektrofotomeeter Hach Lange DR 2800, kiirkeetja	6%
<b>N<sub>üld</sub></b>	EN ISO 11905-1:2003	Spektrofotomeeter Hach Lange DR 2800, Termostaat Hach Lange LT 200	20%
<b>NH<sub>4</sub>-N</b>	HACH 8038 (Nessler meetod)	Spektrofotomeeter Hach Lange DR 2800	8%
<b>NO<sub>2</sub>-N</b>	EVS-EN ISO 10304-1:2009	Ioonkromatograaf Metrohm 930 Compact IC Flex	13%
<b>NO<sub>3</sub>-N</b>	EVS-EN ISO 10304-1:2009	Ioonkromatograaf Metrohm 930 Compact IC Flex	18%

## 2.3 Reoveepuhastid

Reoveepuhasti 1 reostuskoormus on 100 000 inimekvivalenti, mis tähendab, et puhasti väljavoolus on hõljuvaine piirmääraks kuni 15 mg/l ja üldfosfori piirmääraks kuni 0,5 mg/l (Tabel 1). Järelfiltratsiooniks kasutatakse Reoveepuhastis 1 Kruger Hydrotech'i kolme võrk-narmasfiltrit HSF 2622/20-2F, mis igaüks koosneb 20 kettast läbimõõduga 2,6 m. Igal kettal on kokku 28 filterelementi. Filtrid on dimensioneeritud vooluhulgale 900 l/s ehk 3240 m<sup>3</sup>/h. Keskmise ööpäevane vooluhulk, mis järelfiltrit läbib on 25 000 m<sup>3</sup>. Tunnised vooluhulgad kõiguvad 750 – 1150 m<sup>3</sup>/h vahel. Reoveepuhasti 1 järelfiltris sisse- ja väljavoolust said proovid võetud kahel korral. Esimese proovivõtu ajal oli vee läbivool filtrist umbes 1100 m<sup>3</sup>/h ja teise proovivõtu ajal 800 m<sup>3</sup>/h.

Reoveepuhasti 2 reostuskoormus on 30 000 inimekvivalenti, mis tähendab, et puhasti väljavoolus on hõljuvaine piirmääraks kuni 15 mg/l ja üldfosfori piirmääraks kuni 0,5 mg/l (Tabel 1). Reoveepuhastis 2 kasutatakse järelfiltratsiooniks Kruger Hydrotech'i seeria 17/21/31 võrk-narmasfiltrit, mis koosneb 13 kettast läbimõõduga umbes 2,6 m. Keskmine ööpäevane vooluhulk on 5700 m<sup>3</sup>. Tunnised vooluhulgad on suhteliselt stabiilselt 240 m<sup>3</sup>/h juures. Reoveepuhasti 2 järelfiltri sisse- ja väljavoolust said proovid võetud neljal korral. Kahel korral oli vooluhulk 240 m<sup>3</sup>/h ja kahel korral olid proovid võetud aktiivmuda väljakande ajal ehk vooluhulk kõikus filtri ummistamise tõttu 0 – 300 m<sup>3</sup>/h vahel.

Reoveepuhasti 3 on reostuskoormuseks on projekteeritud 22 000 inimekvivalenti, mis tähendab, et puhasti väljavoolus on hõljuvaine piirmääraks 15 mg/l ja üldfosfori piirmääraks kuni 0,5 mg/l. (Tabel 1.) Reoveepuhasti 3 on dimensioneeritud sellisele reostuskoormusele, sest reoveepuhasti 3 olulise osa (umbes 90%) sissevoolust moodustab kõrgete reoainete kontsentratsioonidega toiduainetööstuse reovesi. Reoveepuhastis 3 on kasutusel Mecana narmasfilter SF2/10, mis koosneb kahest kettast, mille läbimõõt on samuti umbes 2 meetrit ja filtreerimispinda on kokku 10 m<sup>2</sup>. Keskmine ööpäevane vooluhulk on 400 m<sup>3</sup> ja maksimaalne võimalik vooluhulk on 40 m<sup>3</sup>/h. Reoveepuhastist 3 on võetud proovid kahel korral, esimese proovivõtu ajal oli läbivool filtrist 20 m<sup>3</sup>/h ja teise proovivõtu ajal 10 m<sup>3</sup>/h.

**Tabel 3 - Uuritavad reoveepuhastid ja nende filtertehnoloogia**

	Reoveepuhasti 1 (RVP 1)	Reoveepuhasti 2 (RVP 2)	Reoveepuhasti 3 (RVP 3)
Filtertehnoloogia	Võrk-kangasfilter	Võrk-kangasfilter	Narmasfilter

## 2.4 Tulemused ja analüüs

Tulemuste osas on välja toodud kolme erineva reoveepuhasti järelfiltri sisse- ja väljavoolu reoainete kontsentratsioonid ning neid omavahel võrreldud. Arvutatud on keskmised ärastusefektiivsused ning analüüsitud reoainete vähenemise põhjuseid.

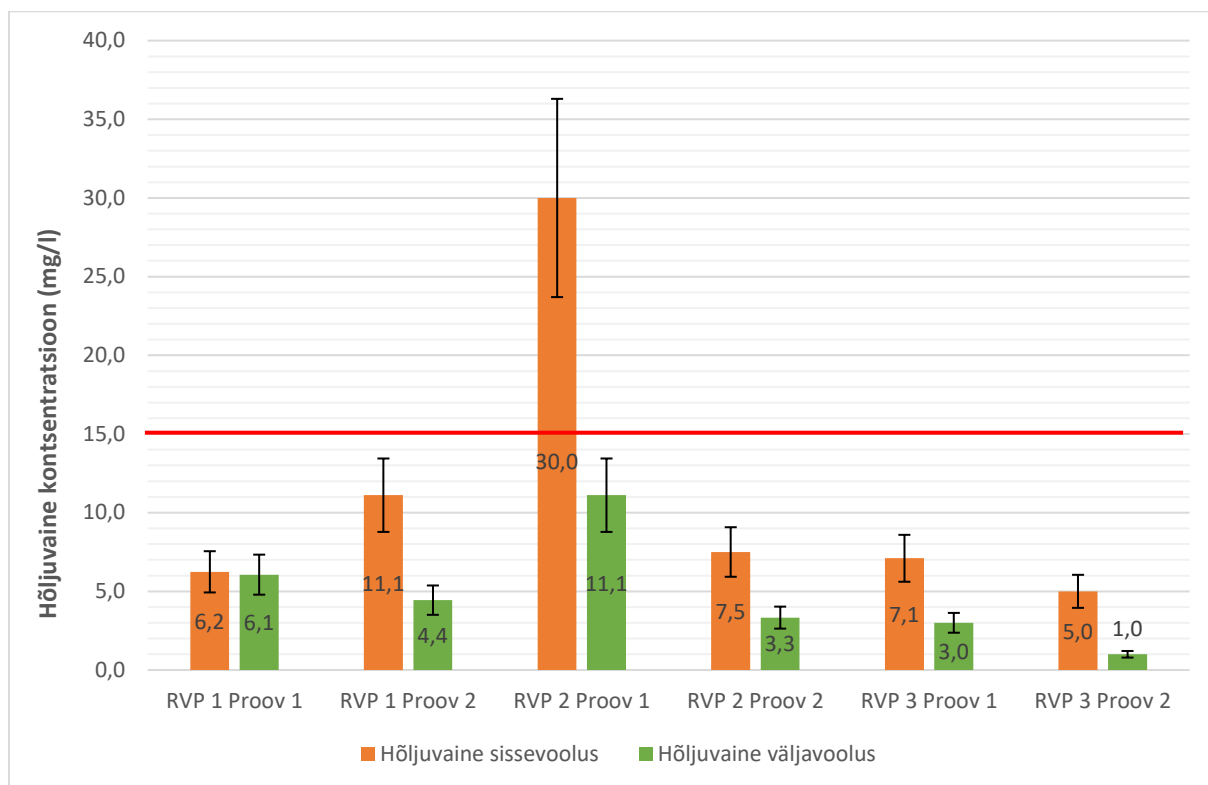
### 2.4.1 Hõljuvaine (HA)

Üldiselt on näha, et kõik filtrid suudavad hõljuvainet suhteliselt efektiivselt eraldada – kui jätta välja reoveepuhasti 1 proov 1, sest seal on nii sisse- kui ka väljavoolu hõljuvaine

konsentratsioonid madalad, siis keskmine hõljuvaine eraldusefektiivsus on 64%, sealjuures võrk-kangasfiltril keskmiselt 60% ja narmasfiltril 69%.

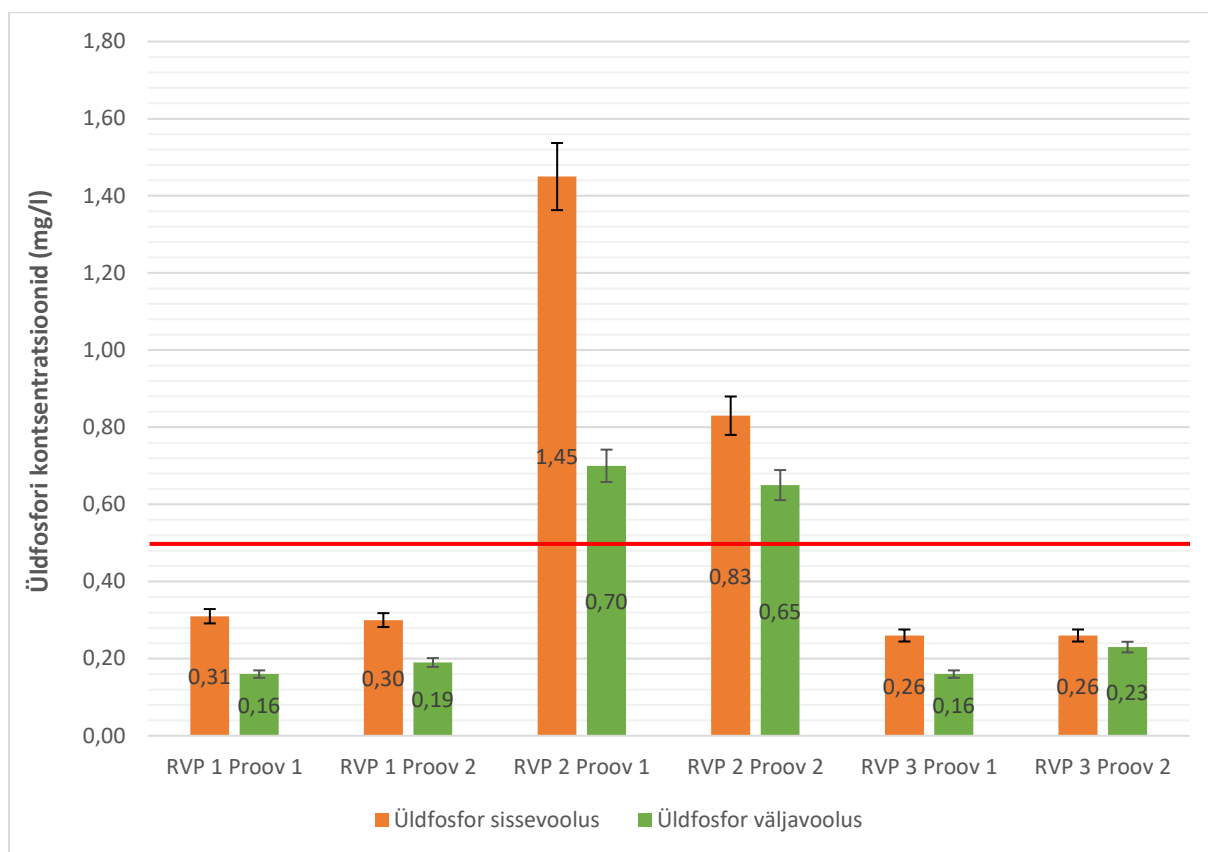
Reoveepuhastis 2 võetud proov 1 puhul ei vasta järefiltri sissevoolus hõljuvaine kontsentratsioon seadusega kehtestatud piirmäärale, küll aga väljavool on normide piires. Kõikidel teistel juhtudel oli juba filtri sissevoolus hõljuvaine kontsentratsioon seadusega kehtestatud piirmääras (15 mg/l). Sellest tulenevalt võib väita, et tavatingimustes on hõljuvaine eraldamiseks järefiltratsiooni jaoks vajadus ainult reoveepuhastis 2. Juhul kui reostuskoormus ja vooluhulk on suuremad, siis käituvad need filtrid lisaabinõuna.

Suurim hõljuvaine eraldamine toimus reoveepuhastis 2 esimese proovi ajal, kui hõljuvaine kontsentratsioon vähenes 18,9 mg/l võrra. Kõige vähem eraldati hõljuvainet reoveepuhastis esimese proovi korral, sest hõljuvaine kontsentratsioon oli ka sissevoolus madal. Hõljuvaine eraldamise kogused erinevad üksteisest väga palju, sest vee vooluhulk filtrisse ja hõljuvaine kontsentratsioon filtri sissevoolus on iga reoveepuhasti puhul väga erinev. Kõige madalamad hõljuvaine kontsentratsioonid väljavoolus andis narmasfilter, kuid neid tulemusi on raske võrrelda teiste filtritega, sest vooluhulk narmasfiltrisse oli oluliselt väiksem.



**Joonis 4 - Hõljuvaine kontsentratsioonid reoveepuhastite 1, 2 ja 3 järefiltri sisse- ja väljavoolus, punase joonega märgitud reoveepuhastitele hetkel kehtivad hõljuvaine piirmäärad Eestis (15 mg/l)**

## 2.4.2 Fosfor



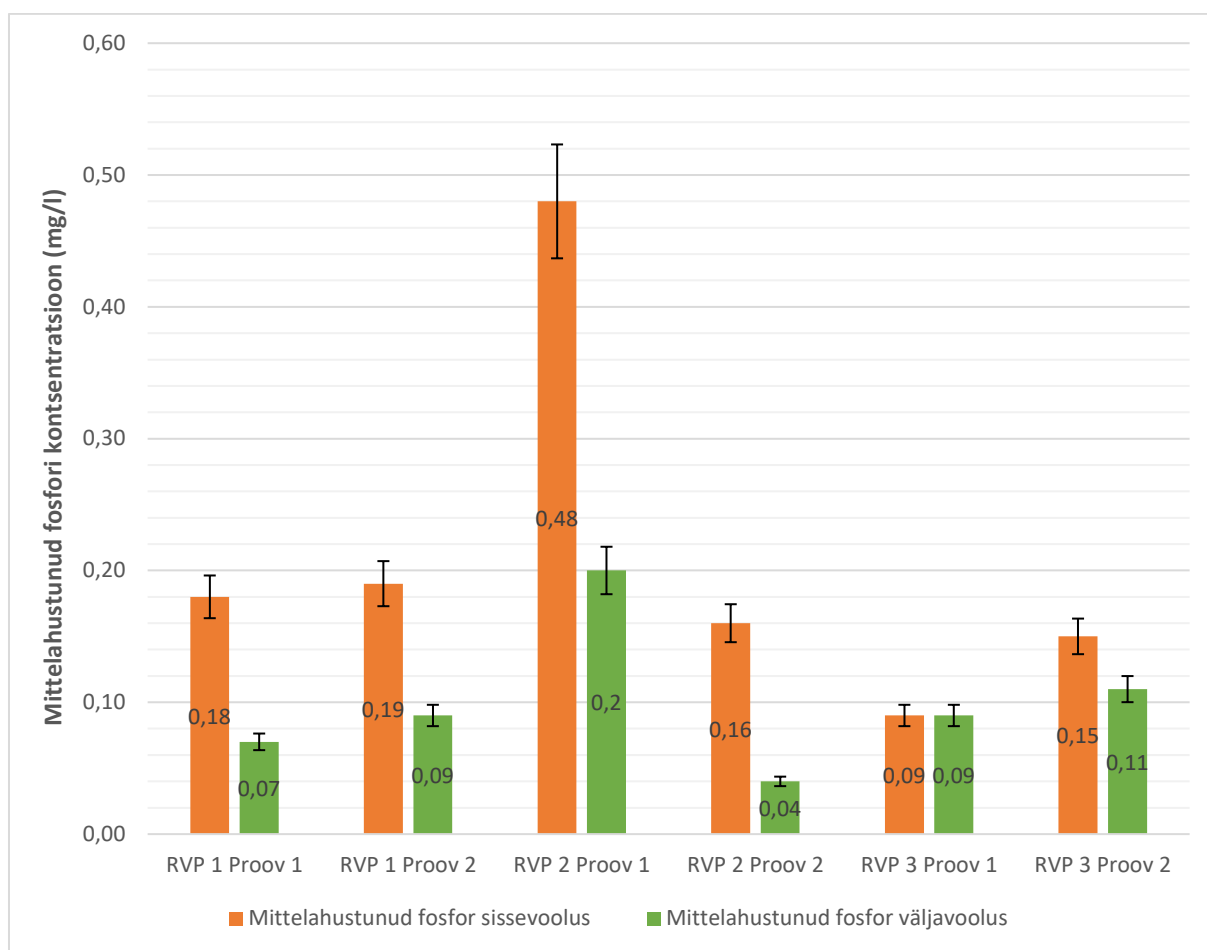
**Joonis 5 - Üldfosfori kontsentratsioonid reoveepuhastite 1, 2 ja 3 järelfiltri sisse- ja väljavoolus, punase joonega märgitud reoveepuhastitele hetkel kehtivad üldfosfori piirmäärad Eestis (0,5 mg/l)**

Jooniselt 5 tuleb välja, et reoveepuhastist 2 mõlemal korral võetud proovide puhul ei vastanud väljavoolu üldfosfori kontsentratsioon vajalikule piirmäärale. Esimesel proovi korral oli üldfosforit 0,2 mg/l ja teisel korral 0,15 mg/l rohkem kui lubatud. Kõikide teiste reoveepuhastite puhul vastasid üldfosfori kontsentratsioonid juba järelfiltri sissevoolus seadusega kehtestatud piirmääradele.

Jooniselt 5 on selgelt näha, et reoveepuhastis 2 on järelfiltratsioon väga oluline fosforiärastuseks. Ilma filtrita oleks heitvees sisaldunud üldfosfor ületanud proov 1 ajal umbes 3 korda ja proov 2 ajal umbes 1,5 korda seaduses kehtestatud üldfosfori piirmäära. Ületatud piirmäärade eest tuleb maksta 5-10 kordseid saastetasusid. Ülejäänud reoveepuhastite puhul võime väita, et järelfiltri ülesandeks oli toime tulla ekstreemolukordadega, kus reoveepuhastisse jõuavad tavaolukorrast kõrgemad üldfosfori kontsentratsioonid või suuremad vooluhulgad.



Mittelahustunud fosfori kontsentratsioonid on arvutatud kasutades üldfosfori ja fosfaatioonide tulemusi. Jooniselt 6 on näha, et filtri töö tulemusena on mittelahustunud fosfor olulisel määral vähenenud. Kõige paremini tuleb kontsentratsioonide muut välja võrk-kangasfiltrite (RVP 1 ja 2) puhul, kus ärastusefektiivsus on keskmiselt 62%. Narmasfiltril (RVP 3) on keskmine ärastusefektiivsus 13%. See on oluliselt madalam võrk-kangasfiltrite tulemustest, sest reoveepuhastis 3 oli katsele 1 eelnevalt kasutatud puhastusprotsessis suures koguses keemilist koagulanti ( $\text{FeSO}_4$ ) ja sellest tulenevalt olid filtri sissevoolus väga väikesed üldfosfori ja fosfaatioonide kontsentratsioonid. Praktikas loetakse fosforiärastuse alumiseks piiriks 0,1 mg/l, millest madalamat kontsentratsiooni reoveepuhastusi väljavoolus on väga raske saavutada.

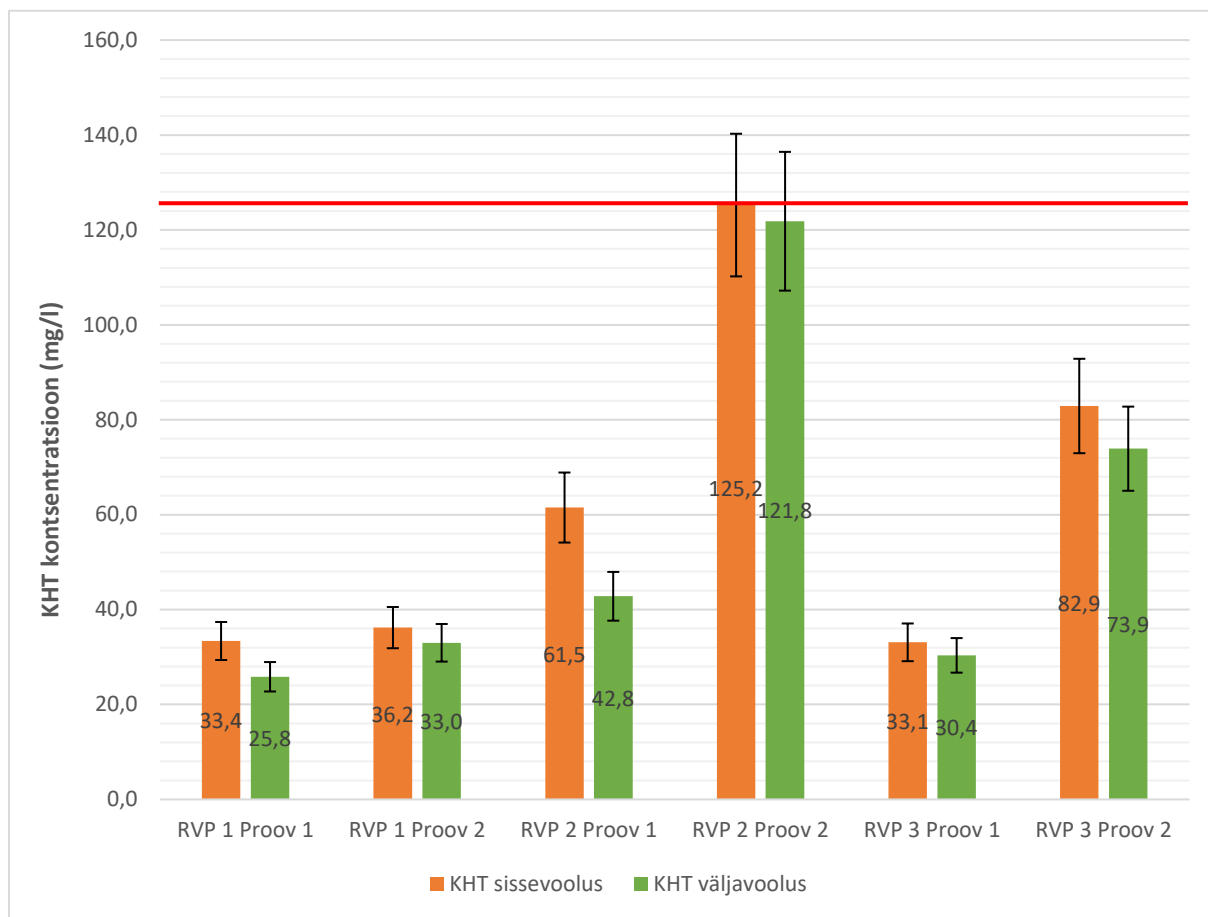


**Joonis 6 - Mittelahustunud fosfori kontsentratsioonid reoveepuhastite 1, 2 ja 3 järelfiltrite sisse- ja väljavoolus**

### 2.4.3 Keemiline hapnikutarve (KHT)

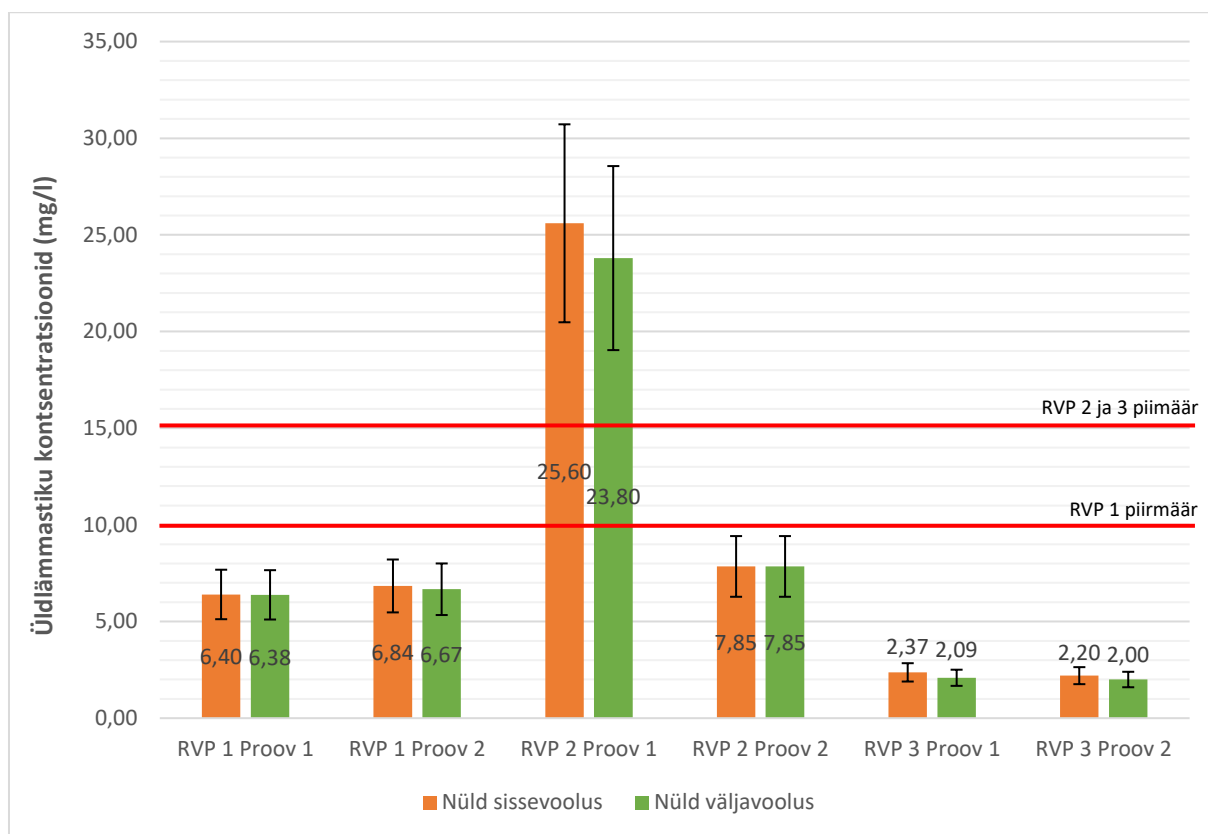
Jooniselt 7 näeme, et järelfiltri töö tulemusena on vähenenud ka heitvee KHT kontsentratsioonid. Muutused on oluliselt väiksemad kui mittelahustunud fosforil, kuid siiski märgatavad. Võrk-kangasfiltrite keskmine KHT ärastusefektiivsus oli 16% ja narmasfiltril umbes 10%.

Kõigil kolmel reoveepuhastil on väljavoolus kehtestatud KHT kontsentratsiooni piirmääraks 125 mg/l. See tähendab, et kõikide proovide ajal oli järelfiltri sissevoolus juba vajalik KHT kontsentratsioon saavutatud ning järelfilter töötab lisaabinõuna oodatust kõrgemate reoainete kontsentratsioonide puhul. Ainukese erandina on reoveepuhastis 2 võetud 2. proov, kus järelfiltri sissevoolus ületas KHT kontsentratsioon lubatud piirmäära 0,2 mg/l võrra. Antud ületamine jääb katsetulemuste mõõtemääramatuse sisse, milleks KHT puhul oli 12%.



**Joonis 7 - KHT kontsentratsioonid reoveepuhastite 1, 2 ja 3 järelfiltri sisse- ja väljavoolus, punase joonega märgitud reoveepuhastitele hetkel kehtivad KHT piirmäärad Eestis (125 mg/l)**

## 2.4.4 Lämmastik

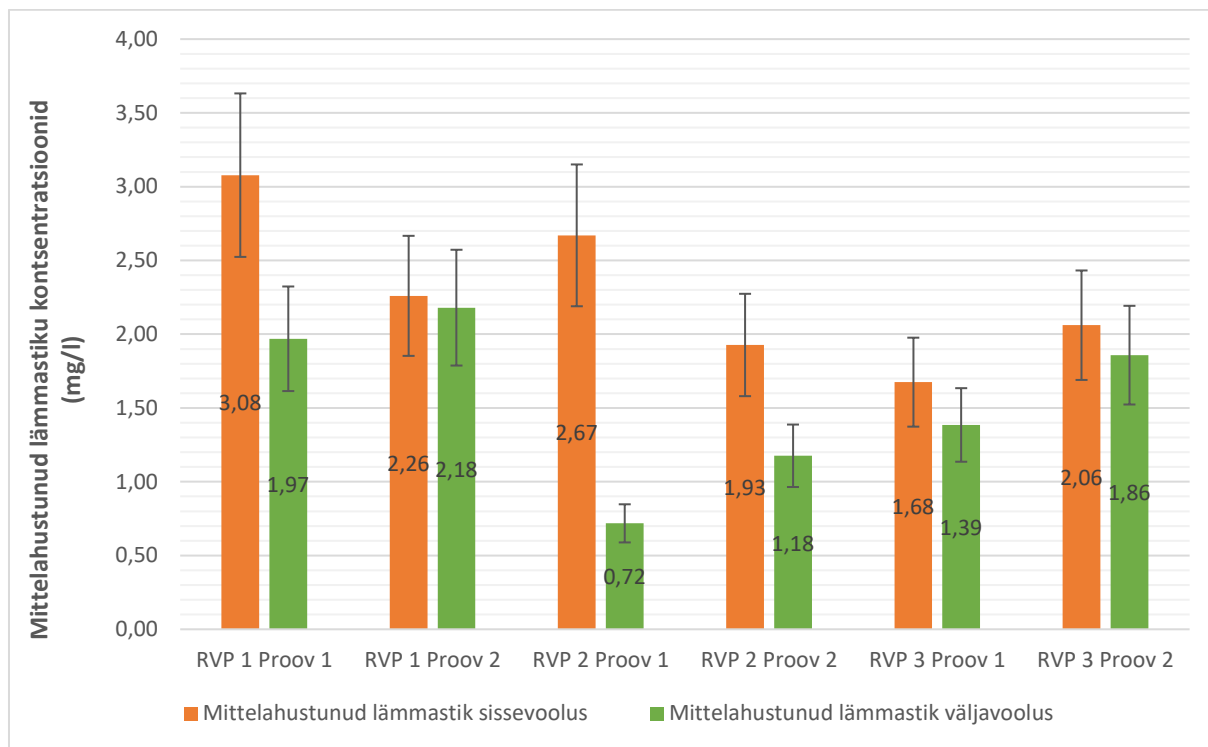


**Joonis 8 - Üldlämmastiku kontsentratsioonid reoveepuhastite 1, 2 ja 3 järelfiltri sisse- ja väljavoolus, punase joonega märgitud reoveepuhastitele hetkel kehtivad üldlämmastiku piirmäärad Eestis (10 ja 15 mg/l)**

Jooniselt 8 on näha, et järelfiltri töö tulemusena on üldlämmastiku kontsentratsioonid väga vähesel määral vähenenud. Kõik vähenemised on toimunud mõõtemääramatuse piires, mistõttu on raske öelda, kas ka päriselt üldlämmastiku kontsentratsioon on vähenenud. Kontsentratsioonide muut on väike, sest suure osa üldlämmastikust moodustavad heitvees lahustunud lämmastikioonid ( $\text{NO}_2\text{-N}$ ,  $\text{NO}_3\text{-N}$ ,  $\text{NH}_4\text{-N}$ ), mida järelfilter oma töö käigus ei suuda veest välja filtreerida. Kogu üldlämmastiku vähenemine toimub mittelahustunud lämmastiku arvelt.

Reoveepuhasti 1 ja 3 mõlema proovi ning reoveepuhasti 2 proov 2 puhul jäi üldlämmastiku kontsentratsioon järelfiltri sisse- ja väljavoolus seadusega kehtestatud piirmääradesse. Reoveepuhasti 2 proov 1 järelfiltri sissevoolus ületas üldlämmastiku kontsentratsioon piirmäära umbes 10 mg/l ja väljavoolus 9 mg/l.

Keskmine ärastusefektiivsus võrk-kangasfiltritel oli 2,5% ja narmasfiltril 10%. Mõlemad muutused jäävad mõõtemääramatuse piiridesse.



### Joonis 9 - Mittelahustunud lämmastiku kontsentratsioonid reoveepuhastite 1, 2 ja 3 järelfiltri sisse- ja väljavoolus

Mittelahustunud lämmastiku kontsentratsioonid järelfiltri sisse- ja väljavoolus on arvutatud üldlämmastiku tulemustest nitrit-, nitraat- ja ammooniumlämmastik maha lahutades.

Jooniselt 9 on näha, et järelfiltri töö tulemusena on toimunud ka mittelahustunud lämmastiku kontsentratsiooni vähenemine. Kontsentratsiooni muutus on väike ja enamustel katsetel jääb mõõtemääramatuse piiridesse, kuid näiteks reoveepuhasti 1 proov 1 ja reoveepuhasti 2 proov 1 ja 2 puhul võime kindlalt väita, et mittelahustunud lämmastiku kontsentratsioon on filtri töö tulemusena vähenenud.

Keskmine mittelahustunud lämmastiku ärastusefektiivsus võrk-kangasfiltritel on 38% ja narmasfiltril 14%. Üldiselt on ärastusefektiivsused väga kõikuvad ja nende põhjal on raske mingeid järeldusi teha.

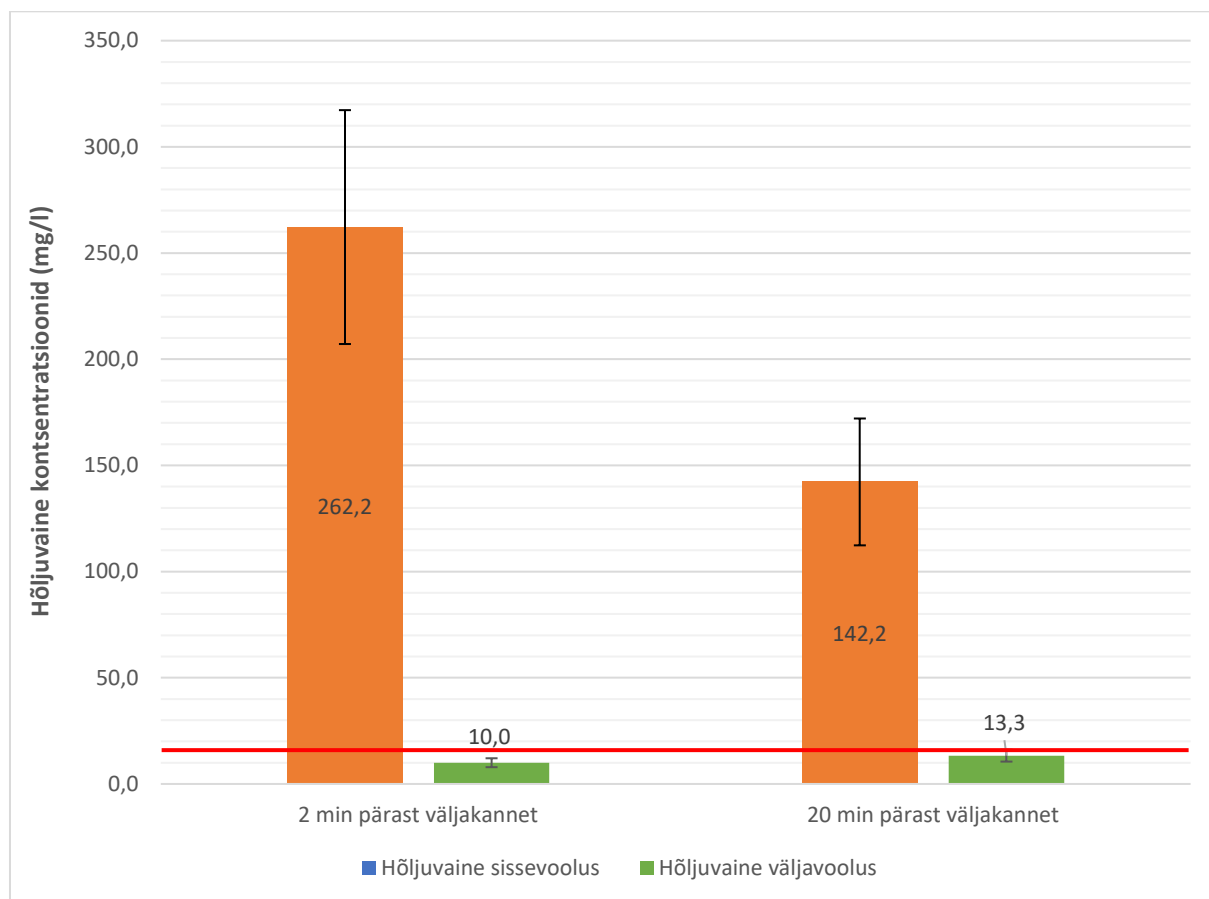
Joonisel 8 kujutatud üldlämmastiku kontsentratsiooni vähenemine toimub mittelahustunud lämmastiku vähenemise arvelt. Seda kinnitab reoveepuhasti 2 proov 1, kus üldlämmastiku kontsentratsioon vähenes 25,6 mg/l - 23,8 mg/l (1,8 mg/l) ja sama proovi mittelahustunud lämmastiku kontsentratsioon vähenes 2,67 mg/l - 0,72 mg/l (1,9 mg/l). Antud proovi

üldlämmastiku kõrge kontsentratsioon filtri sisse- ja väljavoolus tulenes peamiselt kõrgest vees lahustunud ammooniumlämmastiku kontsentratsioonist, mida järelfilter teadaolevalt filtreerida ei suuda.

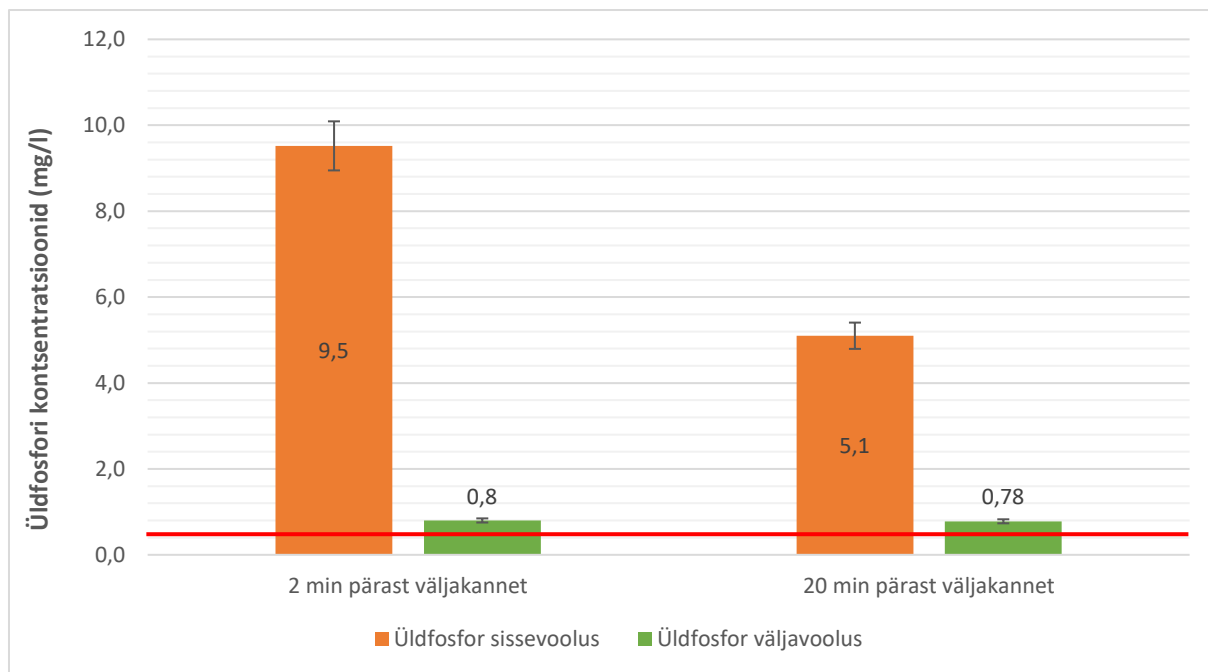
#### 2.4.5 Reoveepuhasti 2 aktiivmuda väljakanne

Reoveepuhastis 2 oli võimalik proovid võtta aktiivmuda väljakande ajal, mis võimaldas testida võrk-kangasfiltri toimimist ekstreemolukordades, kus sissevoolu hõljuvaine kontsentratsioon on väga kõrge.

Jooniselt 10 on näha, et reoveepuhastis 2 olev võrk-kangasfilter suudab väga hästi toime tulla ka kõrgemate hõljuvaine kontsentratsioonidega. Ärastusefektiivsus on ka kõrgete hõljuvaine sissevoolu kontsentratsioonidega keskmiselt 94%. Isegi aktiivmuda väljakande ajal suutis filter oma väljavoolus hoida hõljuvaine kontsentratsiooni madalamal kui seaduses kehtestatud piirmäär seda nõuab (15 mg/l).



**Joonis 10 - Hõljuvaine kontsentratsioonid reoveepuhastis 2 aktiivmuda väljakande ajal järelfiltri sisse- ja väljavoolus, punase joonega märgitud reoveepuhastitele hetkel kehtivad hõljuvaine piirmäärad Eestis (15 mg/l)**



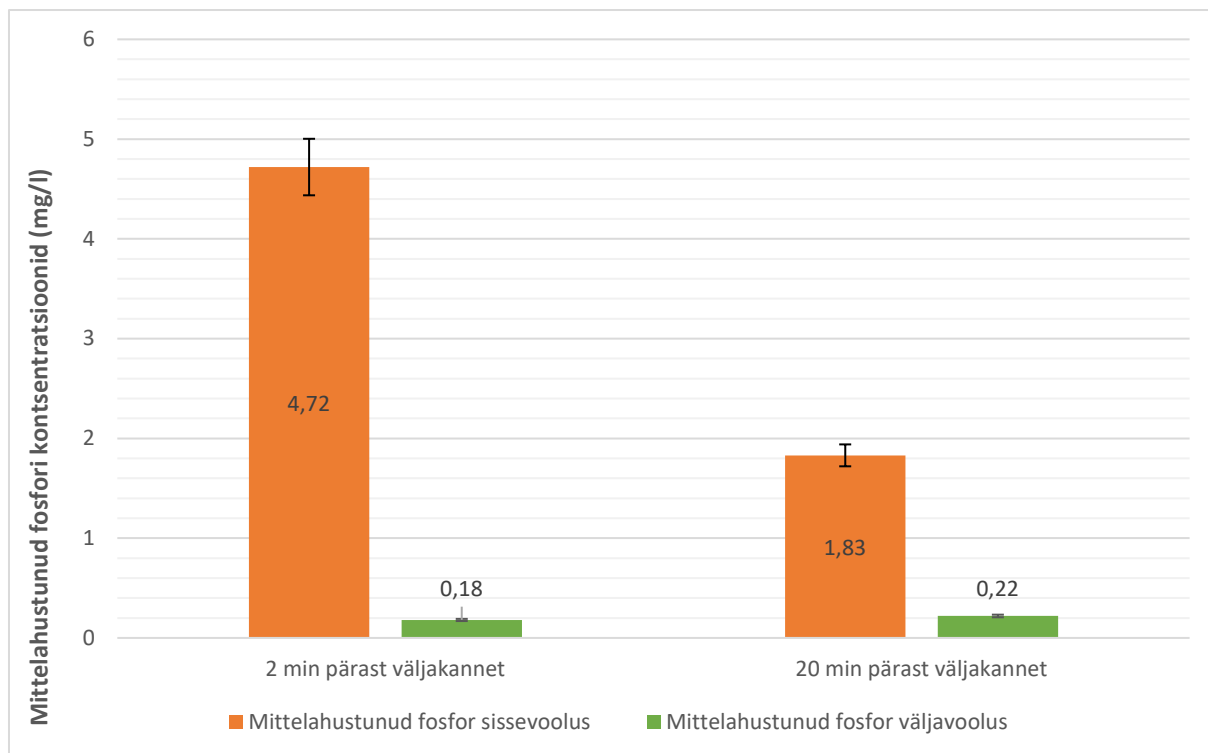
**Joonis 10 - Üldfosfori kontsentratsioonid reoveepuhastis 2 aktiivmuda väljakande ajal järelfiltri sisse- ja väljavoolus, punase joonega märgitud reoveepuhastitele hetkel kehtivad üldfosfori piirmäärad Eestis (0,5 mg/l)**

Üldfosfori kontsentratsioonid olid filtri sissevoolus 9,5 ja 5,2 mg/l vastavalt 2 min ja 20 min pärast aktiivmuda väljakande algust. See tähendab, et ilma järelfiltrita oleks 1 tunni jooksul otse looduskeskkonda läinud üle piirmäära umbes 1 kg üldfosforit, mis saastetasuna ümber arvatuna oleks suurusjärgus 3 000€ ööpäevas (eeldusel, et saastetasu üle piirmäära reostamisel on kümnekordne).

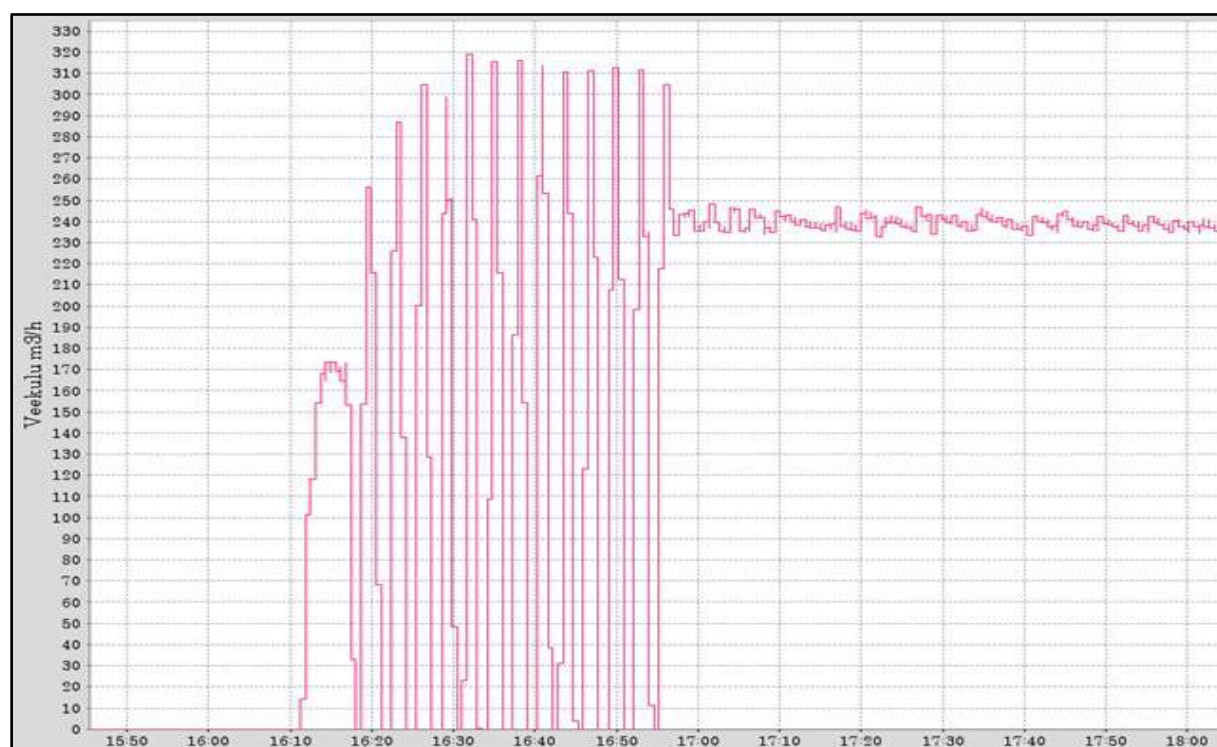
Võrk-kangasfiltri üldfosfori ärastusefektiivsus on keskmiselt 89%, mis on väga kõrge. Üldfosfori kontsentratsiooni vähenemine tuleneb otseselt mittelahustunud fosfori välja filtreerimisest.

Jooniselt 12 tuleb väga selgelt välja mittelahustunud fosfori kontsentratsioonide vähenemine võrk-kangasfiltri töö tulemusena. Keskmise ärastusefektiivsus on kuni 92%.

Kahjuks polnud reoveepuhastis 2 paiknev võrk-kangasfilter kogu aktiivmuda väljakande ajal stabiilselt tööl. Kuna hõljuvaine kontsentratsioonid sissevoolus olid väga kõrged, siis filtri enda puhastussükkel ei suutnud püsivalt filtrit puhtana hoida ja filter ummistus. Sellise ummistuse korral filtri sissevool suleti ja vesi jäi annuspuhasti väljavoolu ühtlustusmahutisse. Kui vee tase filtris langes normaalsele tasemele, siis avati uuesti filtri pealevool. Seetõttu kõikus filtrit läbiv vee vooluhulk aktiivmuda väljakande ajal 0 – 300 m<sup>3</sup>/h (Joonis 13).



**Joonis 11 - Mittelahustunud fosfori kontsentratsioonid reoveepuhastis 2 aktiivmuda väljakande ajal järelfiltri sisse- ja väljavoolus**



**Joonis 12 - Reoveepuhasti 2 järelfiltrit läbiva vee vooluhulga kõikumine aktiivmuda väljakande ajal**

Kokkuvõttes võib väita, et reoveepuhasti 2 võrk-kangasfilter tuli toime kõrgete hõljuvaine kontsentratsioonide filtreerimisega. Ainsaks puuduseks oli puhastussükli võimetus filtermaterjali piisavalt kiiresti puhastada, mistõttu tuleb protsessis kasutada ühtlustusmahutit, et kõrgete reoainete kontsentratsioonidega heitvesi otse ülevoolu ja edasi looduskeskkonda ei läheks.

## 2.5 Järeldused

Mõlemat tüüpi filtrid on võimelised edukalt eemaldama reoveest hõljuvainet ja sellega kaasnevalt ka üldfosforit. Kõiki analüüsitud tulemusi arvesse võttes oli võrk-kangasfiltrite hõljuvaine ärastusefektiivsus keskmiselt 61% ja mittelahustunud fosfori ärastusefektiivsus keskmiselt 72%. Narmasfiltri puhul oli hõljuvaine ärastusefektiivsus 69% ja mittelahustunud fosfori ärastusefektiivsus 13%. Narmasfiltri väike mittelahustunud fosfori ärastusefektiivsus tulenes selle väga madalast kontsentratsioonist filtri sissevoolus. Mittelahustund fosfori kontsentratsioon oli kõikide uuritavate filtrite väljavoolus madal ( $<0,2$  mg/l).

Reoveepuhastist 1 ja 3 võetud proovide puhul ei ületanud üldfosfori kontsentratsioon filtrite väljavoolus seadusega kehtestatud piirmäärasid. Reoveepuhastis 2 oli mõlema proovi korral ja ka aktiivmuda väljakande ajal üldfosfori kontsentratsioon filtri väljavoolus piirmäärast kõrgemal. Üldfosfori vähenemine järelfiltri töö tulemusena on otseses korrelatsioonis hõljuvaine kontsentratsiooni vähenemisega ( $R^2 = 0,9989$ ). Üldfosfor väheneb mittelahustunud fosfori arvelt, mis koos hõljuvainega reoveest välja filtreeritakse. Hõljuvaine filtreerimisega kaasneb ka märgatav KHT kontsentratsiooni langus, keskmiselt 13%. See tuleneb otseselt orgaanilise aine filtreerimisest.

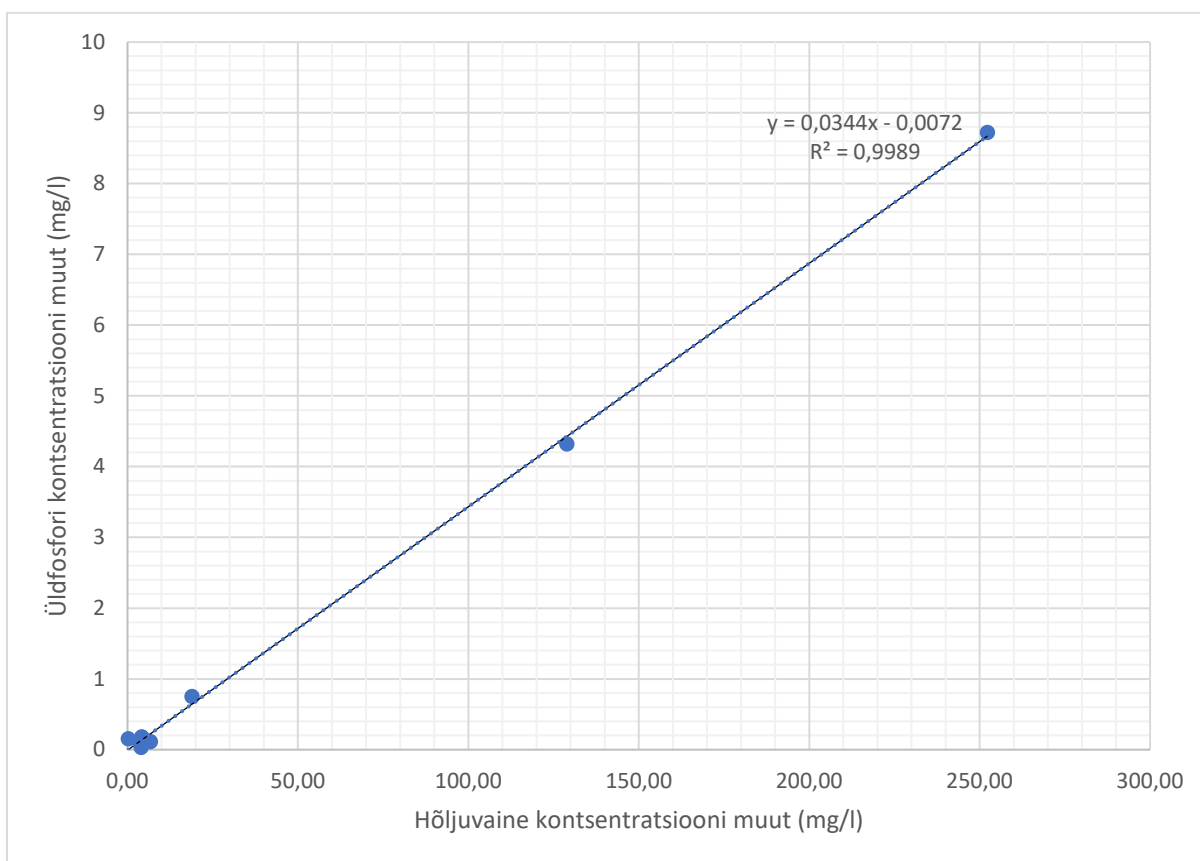
Üldlämmastiku puhul toimus väikene vähenemine filtri sisse- ja väljavoolu võrreldes, kuid see jäi mõõtemääramatuse piiridesse, mistõttu on raske öelda, kas filtri töö tulemusena vähenes üldlämmastik või mitte. Samas oli näha, et mittelahustunud lämmastiku kontsentratsioon vähenes vähemalt kahe proovi puhul. Sellest tulenevalt võime väita, et järelfiltratsiooni tulemusena on võimalik ka vähesel määral üldlämmastiku kontsentratsioone reoveepuhasti väljavoolus vähendada.

Kokkuvõttes võime väita, et üldfosfori kontsentratsiooni vähendamiseks reoveepuhasti väljavoolus on mõistlik kasutada järelfiltratsiooni, sest üldfosfori vähenemine tuleneb otseselt hõljuvaine filtreerimisest. Kui on vajadus üldfosfori kontsentratsiooni reoveepuhasti



väljavoolus veelgi rohkem vähendada, siis tuleks kasutada sobivat koagulanti, et hõljuvaine helbed saavutaksid suurema läbimõõdu ja jääksid filtermaterjalile kinni. Võrk-kangasfiltrid suudavad vajadusel toime tulla kõrge hõljuvaine kontsentratsiooniga sissevoolus, kuid vajavad lisamahutit, kus pealevool saaks vajadusel koguneda kuni filtri puhastustsükkel järelle jõuab ja filter uuesti tööle hakkab. Tavaolukorras on narmasfilter väga potentsiaalne, sest see suutis vähendada hõljuvainet kõige madalamale kontsentratsioonile, seda küll vaid 10-20 m<sup>3</sup>/h vooluhulkade juures. Tulenevalt katseobjekti ülesehitusest ei olnud kahjuks võimalik filtrit suuremate vooluhulkade või ekstreemolukordadega katsetada.

Kui üldfosfori piirmäärad reoveepuhasti väljavoolus peaksid lähitulevikus veelgi madalamale langema, siis oleks kasulik paigaldada reoveepuhastile järelfilter, mille täpne tehnoloogia ja dimensioneerimine tuleb valida vastavalt olukorrale. Samas hetkel saavutasid töös analüüsitud puhastid piirmäärad enamasti ka ilma järelfiltratsioonita, kuid filtratsiooni kasutades oli võimalik vähendada puhasti poolt makstavaid saastetasusid, mis suuremate puhastite puhul võivad olla oluliseks majanduslikuks eeliseks.



**Joonis 13 - Üldfosfori kontsentratsiooni vähenemise sõltuvus hõljuvaine kontsentratsiooni vähenemisest**

## Kokkuvõte

Käesolevas töös on uuritud Eesti reoveepuhastites kasutatavate filtratsioonitehnoloogiate efektiivsust fosforiärastuseks. Eesmärgi saavutamiseks analüüsiti kolmes reoveepuhasti järelfiltrist võetud proove. Mõõdeti reoainete (HA, KHT,  $P_{\text{üld}}$ ,  $PO_4\text{-P}$ ,  $N_{\text{üld}}$ ,  $NO_2\text{-N}$ ,  $NO_3\text{-N}$  ja  $NH_4\text{-N}$ ) kontsentratsioonid järelfiltri sisse- ja väljavoolus.

Analüüsides selgus, et hõljuvaine kontsentratsiooni vähendamisega heitvees väheneb ka üldfosfori kontsentratsioon ( $R^2 = 0,9989$ ).

Hõljuvainet suutsid kõik uuritavad filtrid efektiivselt heitveest eraldada. Võrk-kangasfiltrite keskmine hõljuvaine ärastusefektiivsus oli 61% ja narmasfiltritel 69%. Kõige madalamad hõljuvaine kontsentratsioonid saavutas narmasfilter, kuid seda ka väikse vooluhulga juures (10 – 20 m<sup>3</sup>/h). Kõrgemate vooluhulkade puhul on siiani eelistatud võrk-kangasfiltreid.

Üldfosforit vähenes hõljuvaine arvelt kõikides filtrites olulisel määral. Võrk-kangasfiltrite puhul oli ärastusefektiivsus keskmiselt 75% ja narmasfiltri korral 13%. Narmasfiltri väike efektiivsus tulenes otseselt madalatest üldfosfori kontsentratsioonidest sissevoolus (0,26 mg/l), mis filtri töö tulemusena vähenes keskmiselt kontsentratsioonini 0,19 mg/l. Praktikas on väga raske saavutada reoveepuhasti väljavoolus üldfosfori kontsentratsiooni alla 0,1 mg/l.

Võrk-kangasfiltri efektiivsust uuriti ka ekstreemtingimustes, kus filtrisse jõudis väga kõrgete reoainete kontsentratsioonidega heitvesi (HA – 260 mg/l,  $P_{\text{üld}}$  – 9,5 mg/l). Filter suutis umbes tunni aja jooksul läbivoolu normaliseerida ning väljavoolu jõudis keskmiselt hõljuvainet 11 mg/l ja üldfosforit 0,8 mg/l. Ainukeseks piiranguks oli ühtlustusmahuti vajadus, sest filtri puhastussükkel ei jõudnud filtermaterjali piisavalt kiiresti puhastada ning filter läks umbe. Kahjuks polnud võimalik sarnaseid tingimusi narmasfiltri puhul analüüsida.

Tulemustest selgub, et heitvee fosforisisalduse vähendamiseks on kasulik võtta kasutusele järelfilter. Konkreetne tehnoloogia ja järelfiltri dimensioonid tuleb valida vastavalt heitvee reoainete sisaldusele, keskmistele ööpäevastele vooluhulkadele ning potentsiaalsetele ekstreemtingimustele. Võrk-kangasfilter on praktikas ennast tõestanud ja suudab toime tulla normaal- ja ekstreemtingimustes. Narmasfilter on parema hõljuvaine ärastusefektiivsusega, kuid tema tööd rasketes tingimustes tuleks edaspidistes uuringutes põhjalikumalt analüüsida. Selleks, et saada ülevaade hõljuvaine koormuse, läbilaskvuse ja efektiivsuse omavahelise sõltuvuse osas oleks vaja teha täiendavaid katseid pilootseadmetes, sest reoveepuhastites on suure reostusriski tõttu nende tegemine raskendatud.

## Kasutatud kirjandus

1. Reovee puhastamise ning heit- ja sademevee suublasse juhtimise kohta esitatavad nõuded, heit- ja sademevee reostusnäitajate piirmäärad ning nende nõuete täitmise kontrollimise meetmed (16.12.2016) Riigi Teataja. Kasutatud 24.05.2018. Saadaval veebist: <https://www.riigiteataja.ee/akt/113062013013?leiaKehtiv>.
2. Keskkonnatasude seadus §20, lg 1 (30.06.2017) Riigi Teataja. Kasutatud 24.05.2018. Saadaval veebist: <https://www.riigiteataja.ee/akt/130062017034?leiaKehtiv>.
3. Smith, V. H.; Schindler, D. W. Eutrophication science: where do we go from here? Trends in Ecology and Evolution; 2009. Saadaval veebist: [http://izt.ciens.ucv.ve/ecologia/Archivos/ECO\\_POB%202009/ECOPO7\\_2009/Smith%20y%20Schindler%202009.pdf](http://izt.ciens.ucv.ve/ecologia/Archivos/ECO_POB%202009/ECOPO7_2009/Smith%20y%20Schindler%202009.pdf).
4. Gilmour, D.; Blackwood, D.; Comber, S.; Thornell, A. Identifying human waste contribution of phosphorous loads to domestic wastewater, 2008. Saadaval veebist: <https://goo.gl/ihdE44>.
5. Mekkonen, M. M.; Hoekstra, A. Y. Global Anthropogenic Phosphorus Loads to Freshwater and Associated Grey Water Footprints and Water Pollution Levels: A High-Resolution Global Study. An AGU Journal. Water Resources Research, p. 345-358.
6. Vymazal, J. Types of Constructed Wetlands for Wastewater Treatment: Their Potential for Nutrient Removal. Transformations of Nutrients in Natural and Constructed Wetlands. Backhuys Publishers, Leiden, p. 1-93.
7. HELCOM Recommendation 28E/5, Municipal wastewater treatment. 15.11.2017. Saadaval veebist: <http://www.helcom.fi/Recommendations/Rec%2028E-5.pdf>
8. HELCOM Recommendation 28E/6, On-site wastewater treatment of single family homes, small businesses and settlements up to 300 person equivalents (P.E). 15.11.2017. Saadaval veebist: <http://www.helcom.fi/Recommendations/Rec%2028E-6.pdf>
9. Davis, L. M.; Water and wastewater engineering. Design Principles and Practice, New York: McGraw-Hill; 2010, p. 1301. Saadaval veebist:

<https://adminimages.muhandes.net/content/library/5cef8f7142f947a8ad18eedb881df780.pdf>

10. Ronkanen, A.K.; Marttila, H.; Celebi, A.; Kløve, B.; The role of aluminium and iron in phosphorus removal by treatment peatlands; 2014. Saadaval veebist: <https://kundoc.com/pdf-the-role-of-aluminium-and-iron-in-phosphorus-removal-by-treatment-peatlands-.html>
11. Vidal, B.; Hedström, A.; Herrmann, I. Phosphorus reduction in filters for on-site wastewater treatment. J. Water Process Engineering, vol. 22, 2018, p. 210-217. Saadaval veebist: <https://reader.elsevier.com/reader/sd/30423D652E2E1C8D04F12592218D4A27C0407D2F044E188D9997FADFBBC922006DAC46399421E61C98E3F79E9FCA8719>.
12. Veolia Hydrotech Discfilters, Water treatment technologies; <http://technomaps.veoliawatertechnologies.com/hydrotech-discfilter/en/#c5b40fmVs1> viimati alla laetud 28.05.2018.
13. Huber Disc Filter RoDisc, Waste water solutions; [http://www.huber.de/fileadmin/01\\_products/01\\_screens/04\\_micro\\_screens/04\\_rodisc/pro\\_rodisc\\_en.pdf](http://www.huber.de/fileadmin/01_products/01_screens/04_micro_screens/04_rodisc/pro_rodisc_en.pdf) viimati alla laetud 27.05.2018.
14. Veolia Hydrotech Discfilter 2200-series; [http://www.kruger.dk/krugeras/ressources/files/1/8215,2901,Hydrotechskivefilter\\_HS\\_F2200-w.pdf](http://www.kruger.dk/krugeras/ressources/files/1/8215,2901,Hydrotechskivefilter_HS_F2200-w.pdf) viimati alla laetud 25.05.2018.
15. Veolia Hydrotech Wastewater recovery, total water managment Solutions for process and wastewater recovery and recycling; <https://www.veoliawatertechnologies.co.uk/applications/water-recovery-waste-resource> viimati alla laetud 22.05.2018.
16. Knapp, T.; Tucker, D; Side-by-side pilot testing of two disk filter manufacturers at the City of Merced wastewater treatment plant. ECO:LOGIC Engineering, Water Environment Foundation.
17. Pile Cloth Media Filtration, Mecana. [http://www.mecana.ch/images/sampled/PDF/Downloads/Tuchfilter/EN/Pile-Cloth-Media-Filtration-brochure-0418A\\_k.pdf](http://www.mecana.ch/images/sampled/PDF/Downloads/Tuchfilter/EN/Pile-Cloth-Media-Filtration-brochure-0418A_k.pdf) viimati alla laetud 24.05.2018.

18. Optimisation of wastewater treatment using pile cloth media filters;  
<http://www.mecana.ch/images/sampledData/PDF/Downloads/Tuchfilter/EN/Optimisation-of-wastewater-0517A.pdf> viimati alla laetud 20.05.2018.
19. Pile cloth media filtration, Mecana;  
<http://www.mecana.ch/images/sampledData/PDF/Downloads/Tuchfilter/EN/Pile-Cloth-Media-Filtration-0517A.pdf> viimati alla laetud 25.05.2018.
20. 50 years Mecana Umwelttechnik GMBH;  
[http://www.mecana.ch/images/sampledData/PDF/Downloads/Firma/50\\_Years\\_of\\_Mecana\\_0414A.pdf](http://www.mecana.ch/images/sampledData/PDF/Downloads/Firma/50_Years_of_Mecana_0414A.pdf) viimati alla laetud 27.05.2018.
21. Solids and phosphorous removal with pile cloth media filtration;  
[http://www.mecana.ch/images/sampledData/PDF/Downloads/Tuchfilter/EN/Phosphor\\_removal/P-removal-Gossau-0517A.pdf](http://www.mecana.ch/images/sampledData/PDF/Downloads/Tuchfilter/EN/Phosphor_removal/P-removal-Gossau-0517A.pdf) viimati alla laetud 23.05.2018.
22. Achieving low phosphorus using pile cloth media filtration;  
[http://www.mecana.ch/images/sampledData/PDF/Downloads/Tuchfilter/EN/Phosphor\\_removal/P-removal-England-0517A.pdf](http://www.mecana.ch/images/sampledData/PDF/Downloads/Tuchfilter/EN/Phosphor_removal/P-removal-England-0517A.pdf) viimati alla laetud 24.05.2018.
23. Judd, S; The MBR book 2nd edition. Principles and Applications of Membrane Bioreactors in Water and Wastewater Treatment, Elsevier, Oxford ISBN 1856174816, 2010 p. 1-536.
24. EVS-ISO 5667-10:2013. Vee kvaliteet. Proovivõtt. Osa 10: Juhised reoveest ja heitveest proovide võtmiseks. Saadaval veebist: <https://www.evs.ee/eelvaade/evs-iso-5667-10-2013-et.pdf>.
25. EVS-EN ISO 5667-3:2012. Vee kvaliteet. Proovivõtt. Osa 3: Veeproovide konserveerimine ja käitlemine. Saadaval veebist: <https://www.evs.ee/eelvaade/evs-en-iso-5667-3-2012-et.pdf>.

# Lisa 1.

Tabel 4 - Proovivõtutabel

Kuupäev	Proovivõtu kellaeg	Prooviliik	Tempe- ratuur (°C)	Läbivool (m³/h)	Proovivõtukoht	Ilm	Proovivõtu sügavus (cm)	Mahuti sügavus (m)	Kirjeldus
08.04.2016	10.30	Punktproov	12,2	1100	Reoveepuhasti 1 järelfiltri sissevool	Kuiv, vahelduv pilvisus, +5 kraadi, öösel sadanud	20	1	Natukene heljumit, keskmiselt kollakas
					Reoveepuhasti 1 järelfiltri sissevool		20	0,5	Selge, kergelt kollakas
21.04.2016	16.00	Punktproov	16,5	240	Reoveepuhasti 2 järelfiltri sissevool	Kuiv, vahelduv pilvisus, +8 kraadi, öösel vähesed sademed	10	3	Keskmiselt heljumit, kergelt kollakas
	16.02				Reoveepuhasti 2 järelfiltri väljavool		10	1,5	Selge, õrnalt kollakas
	16.12				Reoveepuhasti 2 järelfiltri väljavool 2 min		10	3	Rohkelt heljumit, kollakas
	16.14				Reoveepuhasti 2 järelfiltri väljavool 2 min		10	1,5	Selge, kergelt kollakas
	16.32				Reoveepuhasti 2 järelfiltri väljavool 20 min		10	3	Rohkelt heljumit, kergelt kollakas
	16.34				Reoveepuhasti 2 järelfiltri väljavool 20 min		10	1,5	Selge, kergelt kollakas
22.04.2016	9.30	Punktproov	11,4	800	Reoveepuhasti 1 järelfiltri sissevool	Kuiv, vahelduv pilvisus, +6 kraadi, öösel kuiv	20	1	Vähesel määral heljumit, kergelt kollakas
					Reoveepuhasti 1 järelfiltri väljavool		20	0,5	Selge, kergelt kollakas
19.08.2016	12.30	Punktproov	16,5	240	Reoveepuhasti 2 järelfiltri sissevool	Niiske, vahelduv pilvisus, +18 kraadi, öösel sadanud	10	3	Väga vähesel määral heljumit, õrnalt kollakas
					Reoveepuhasti 2 järelfiltri väljavool		10	1,5	Selge, õrnalt kollakas
19.04.2018	11.35	Punktproov	20	20	Reoveepuhasti 3 järelfiltri sissevool	Niiske, pilves, +7 kraadi, hommikul sademed 5 cm	10	2	Kollakas, keskmiselt heljumit
19.04.2018	11.40	Punktproov	20	20	Reoveepuhasti 3 järelfiltri väljavool		10	2	Kollakas, vähe heljumit
19.04.2018	11.50	Punktproov	20	20	Reoveepuhasti 3 järelfiltri ühtlustusmahuti		10	3	Kollakas, keskmiselt heljumit
08.05.2018	16.17	Punktproov	19,1	10	Reoveepuhasti 3 järelfiltri sissevool	Kuiv, soe +23 kraadi, vihma pole ammu sadanud	10	2	Kollakas, õrnalt heljumit, väikesed tükid
08.05.2018	16.20	Punktproov	19,1	10	Reoveepuhasti 3 järelfiltri väljavool		10	2	Kollakas, heljumit põhimõtteliselt märgata pole

## Lisa 2.



Joonis 1514 - Reoveepuhasti 2 Kruger Hydrotech võrk-kangasfilter

### **Lisa 3.**



**Joonis 156 - Reoveepuhasti 3 Mecana narmasfilter**



## Summary

### Filtration technologies for phosphorus removal in wastewater treatment plants

Sander Hermet

This thesis concentrates on the filtration technologies used in Estonia for phosphorus removal. It was carried out by taking samples from three different wastewater filtration unit influent and effluent and analysing the properties and concentrations of pollutants (HA, KHT,  $P_{\text{total}}$ ,  $\text{PO}_4\text{-P}$ ,  $N_{\text{total}}$ ,  $\text{NO}_2\text{-N}$ ,  $\text{NO}_3\text{-N}$  and  $\text{NH}_4\text{-N}$ ).

Correlation between removal of total suspended solids and phosphorus was confirmed ( $R^2 = 0,9989$ ).

All three filters were able to perform effectively during the filtration of total suspended solids. Mesh filters had a mean efficiency of 61% and pile cloth filter 69% for the removal of total suspended solids. The lowest total suspended solids concentration was achieved by pile cloth filter, although it was during low influent flow rate ( $10\text{-}20 \text{ m}^3/\text{h}$ ). In case of higher influent flow rates, mesh filters were preferred because a mean flow rate of  $33 \text{ m}^3/\text{h}$  was dimensioned for 1 disk.

Total phosphorus was also efficiently removed in all three filters. Mesh filters had a mean efficiency of 75% and pile cloth filter 13% for the removal of total phosphorus. Low efficiency of pile cloth filter was due to low total phosphorus concentrations in influent ( $0,26 \text{ mg/l}$ ). It was only reduced to  $0,19 \text{ mg/l}$  because achieving lower concentrations than  $0,1 \text{ mg/l}$  for total phosphorus is technologically difficult.

Mesh filter was also tested in upset conditions, where the influent pollutant concentrations and water flow was higher ( $\text{TSS} = 260 \text{ mg/l}$ ,  $P_{\text{total}} = 9,5 \text{ mg/l}$ ). The filter was able to normalise the flow rate in an hour and the effluent concentrations were about  $11 \text{ mg/l}$  for total suspended solids and  $0,8 \text{ mg/l}$  for total phosphorus. The only restriction was the necessity for an equalising tank because the cleaning cycle of the filter was unable to keep the filter material clean and the mesh filter clogged. Unfortunately, it was unable to reproduce similar conditions for pile cloth filter.

On-site wastewater filtration is recommended for all wastewater plants where the total phosphorus concentrations are high or there is a major possibility for a high concentration of pollutants or there are regular peaks in flow rate. The type of the filter and its dimensions should be chosen by analysing the concentrations of wastewater pollutants, mean daily flow rates and potentials plant upsets. Mesh filter has proved itself capable of coping with normal and higher influent flow rates and pollutant concentrations while the pile cloth filter has a better mean efficiency for the removal of total suspended solids. Pile cloth filter efficiency for pollutant removal in upset conditions should be the aim of continued research on given topic. In order to get a better understanding of the correlation between the loads of total suspended solids, their filtration volume and efficiency, pilot testing should be carried out in smaller size because testing in wastewater treatment plants is complicated due to high risk of contamination.

# Tänuavaldused

Töö autor tänab südamest kõiki, kes käesoleva töö valmimisel abiks olid ja selle esitamise võimalikuks tegid:

Taavo Tenno

Markus Raudkivi

Aimar Kivirüüt

Kristel Kroon

Anni Mandel

Christina Vohla

Anne Paaver

Kati Klein

Erik Mölder

Kaido Põhako

Aivar Maurer

Katrin Silm

Elari Arjakas

Ingrid Hermet

Andres Hermet

# Infoleht

## Heitvee filtratsioonitehnoloogia reoveepuhastis fosforiärastuseks

Heitvee järelfiltratsioon on võetud kasutusele reoveepuhastites eesmärgiga vähendada üldfosfori kontsentratsioone heitvees. Järelfiltratsiooni tulemusena väheneb heitvees hõljuvaine sisaldus, mille tulemusena langeb ka fosfori kontsentratsioon. Töös uuriti Eesti reoveepuhastites kasutusel olevaid filtratsioonitehnoloogiaid (võrk-kangas- ja narmasfiltrid), anti hinnang nende reoainete ärastusefektiivsusele ning kinnitati, et hõljuvaine eraldamisega heitvees on võimalik vähendada ka üldfosfori kontsentratsiooni ( $R^2 = 0,9989$ ). Eestis kasutusel olevad võrk-kangasfiltrid suutsid heitveest ärastada hõljuvaint efektiivsusega 61% ja narmasfiltrid 69%. Selle tulemusena vähenes üldfosfori kontsentratsioon võrk-kangasfiltrite puhul 75% ja narmasfiltritel 13%. Ekstreemtingimustes testiti võrk-kangasfiltrit, mis suutis kõrgete reoainete kontsentratsioonide korral hõljuvaint eraldada keskmiselt 94% ja üldfosforit 89%. Järelfiltratsiooni soovitatakse kasutada kõikides reoveepuhastites, kus on vajadus fosfori lisaärastuseks, esineb ootamatult kõrgeid reoainete kontsentratsioone või vooluhulkade tõusu.

Märksõnad: *fosforiärastus, järelfiltratsioon, võrk-kangasfilter, narmasfilter, kangasfilter, hõljuvaine*

CERCS koodid: P305 Keskkonnakeemia, T270 Keskkonnatehnoloogia, reostuskontroll

## **Filtration technologies for phosphorus removal in wastewater treatment plants**

On-site wastewater filtration is used in wastewater treatment plants for phosphorus removal. It is done by filtrating suspended solids due to which the concentration of total phosphorus also decreases. This thesis concentrated on the filtration technologies currently used in Estonia (mesh and pile cloth filters). Evaluation of the effectiveness for removal of pollutants was given and the correlation between removal of suspended solids and phosphorus was confirmed ( $R^2 = 0,9989$ ). Mesh filters in Estonia were able to remove suspended solids from wastewater with the mean efficiency of 61% while pile cloth filters were able to do this with the mean efficiency of 69%. Because of that, total phosphorus concentration was decreased by 75% in mesh filters and 13% in pile cloth filters. Mesh filter was also tested in upset conditions, where the influent pollutant concentrations and water flow was higher. It was able to remove total suspended solids with the mean efficiency of 94% and total phosphorus by 89%. On-site wastewater filtration is recommended for all wastewater plants where the total phosphorus concentrations are high or there is a major possibility for a high concentration of pollutants or there are regular peaks in flow rate.

Keywords: *phosphorus removal, secondary filtration, mesh filter, pile cloth filter, discfilter, total suspended solid, filtration technologies*

CERCS codes: P305 Environmental Chemistry, T270 Environmental technology, pollution control

# **Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks**

Mina, **Sander Hermet**, isikukood 39202282774

1. annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose  
**„Heitvee filtratsioonitehnoloogia reoveepuhastis fosforiärastuseks“**

mille juhendaja on **Taavo Tenno**.

1.1.reprodutseerimiseks säilitamise ja üldsusele kättesaadavaks tegemise eesmärgil, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace-is lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;

1.2.üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tartu Ülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace´i kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.

2. olen teadlik, et punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.

3. kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid õigusi.

**Tartus, 30.05.2018**